WEBERS ILLUSTRIERTE KATECHISMEN

No 109

Schwartze.

Elektrotechnik.

5. Auflage.

4 M. 50 Pf

LEIPZIG, VERLAG von J. J. WEBER.

Katechismus der Heizung, Beleuchtung und Ventilation.

Von

Th. Schwartze.

Mit 159 in den Text gedruckten Abbildungen.

Inhaltsverzeichnis.

Katechismus der Elektrotechnik.

Katechismus

der

Elektrotechnik.

Ein Lehrbuch

für

Praktiker, Techniker und Industrielle.

Von

Theodor Schwartze,

Ingenieur.

Fünfte, vollständig umgearbeitete Auflage.

Mit 206 in den Text gedruckten Abbildungen.

Leipzig

Verlagsbuchhandlung von J. J. Weber

1894

Vorwort zur fünften Auflage.

In der vorliegenden neuen Auflage hat das Buch eine vollständige Umarbeitung erfahren. Das Frag- und Antwortspiel ist beseitigt worden, um die damit verbundenen Weitschweifigkeiten zu vermeiden. Veraltetes mußte Neuem weichen, um den festgesetzten Umfang nicht zu überschreiten. Insbesondere ist die Theorie und Berechnung der dynamoelektrischen und Wechselstrommaschinen innerhalb der gesteckten Grenzen vervollständigt worden; ferner fanden die Motoren mit Drehfeld Berücksichtigung und das Kapitel über Elektrolyse wurde erweitert.

Der Verfasser hofft, daß in dieser neuen Form das Buch dieselbe freundliche Berücksichtigung findet, wie dies mit den vorhergehenden Auflagen der Fall war.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung.

Erster Abschnitt.

Das absolute Maßsystem und die Potentialtheorie.

Zweiter Abschnitt.

Die Erscheinungen und Gesetze der statischen Elektrizität.

Seite

Dritter Abschnitt.

Die Lehre vom elektrischen Strome.

Vierter Abschnitt.

Magnetismus und Elektromagnetismus.

Fünfter Abschnitt.

Die elektrischen Maßeinheiten und die Messung der elektrischen Größen.

Sechster Abschnitt.

Die galvanischen Elemente.

Siebenter Abschnitt.

Die Dynamomaschinen.

Achter Abschnitt.

Die elektrische Beleuchtung.

Neunter Abschnitt.

Die elektrische Arbeitsübertragung.

Seite

Zehnter Abschnitt.

Die elektrische Gewinnung und Verarbeitung der Metalle.

Katechismus der Elektrotechnik.

Einleitung.

Geschichtliche Entwicklung der Elektrizitätslehre.

Unter den Naturerscheinungen sind diejenigen, die wir als Elektrizität, oder als Wirkungen der Elektrizität bezeichnen, die geheimnisvollsten und man hat anzunehmen, daß deren Ursache in dem innersten Wesen der Materie verborgen liegt.

So viel bekannt ist erregte schon vor mehr als zweitausend Jahren die elektrische Wirkung die Aufmerksamkeit sinnreicher Forscher, aber erst viel später begann man einzusehen, daß die Elektrizität keiner besonderen Ursache zuzuschreiben ist und also nicht etwa von einem besondern Fluidum oder Stoffe herrührt, sondern daß die Elektrizität nebst dem mit ihr im innigsten Zusammenhange stehenden Magnetismus gleich den Naturvorgängen des Schalles, der Wärme, des Lichtes und der Gravitation oder Schwere auf schwingende Bewegungen zurückzuführen ist, die durch das Zusammenwirken der sinnlich wahrnehmbaren Materien und des Äthers zustande kommen.

Man kann in der Geschichte der Elektrizitätslehre eine Reihenfolge von Epochen annehmen, in denen man bezüglich der Erkenntnis der elektrischen Erscheinungen neue Standpunkte gewann und somit auch in der Forschung neue Bahnen verfolgen konnte.

Schon in der ältesten geschichtlichen Zeit war einige Kenntnis der magnetischen und elektrischen Erscheinungen vorhanden. So weist der berühmte Ägyptologe Prof. Brugsch nach, daß die alten ägyptischen Tempel durch hohe metallbekleidete Mastbäume gegen Blitzschlag gesichert wurden. Ferner soll der Kompaß eine uralte chinesische Erfindung sein. Wie weit die Alten sonst noch in das Wesen der Elektrizität und des Magnetismus eingedrungen sind, wissen wir nicht. Was aber die spätere Zeit anbelangt, so ist bekannt, daß man bis in das 16. Jahrhundert nicht über die ersten Anfänge in der Kenntnis dieser Erscheinungen hinausgekommen ist. Hiermit mag die erste Epoche in der Geschichte der Elektrizität gekennzeichnet sein.

Die zweite Epoche datiert von der Entdeckung des Unterschiedes zwischen elektrischer und magnetischer Anziehung und dem tieferen Eindringen in das Wesen der elektrischen Erscheinungen durch die Forschungen des englischen Arztes William Gilbert gegen Ende des 16. Jahrhunderts. Gilbert wies in seinem im Jahre 1600 lateinisch herausgegebenen Werke: „De Arte magnetica“ auf die thatsächlichen Wahrnehmungen hin, wonach die elektrische Attraktion viel allgemeiner auftritt, als die magnetische, und durch den Einfluß feuchter Luft vernichtet werde, was bei der letztern Kraft nicht geschehe. Von ihm rührt auch die Bezeichnung „Elektrizität“ für diese eigentümliche Anziehungskraft her. Man stellte sich damals die Elektrizität als eine die Körper gleichmäßig durchdringende Kraft vor und hatte noch nicht deren repulsive und polare Wirkungsweise erkannt.

Die dritte Epoche beginnt mit der Erkenntnis der elektrischen Abstoßung (Repulsion); diese für das tiefere Verständnis des Wesens der Elektrizität höchst wichtige Entdeckung wird Otto von Guericke zugeschrieben, der davon in seinem ums Jahr 1672 erschienenen Buche „Nova experimenta Magdeburgica“ spricht. Derselbe konstruierte auch die erste Elektrisiermaschine mittels einer rotierenden, durch die Hand geriebenen Schwefelkugel. Diese Versuche

wurden etwas später vom Engländer Hawksbee fortgesetzt, der auch entdeckte, daß im luftleeren Raume mancher Barometer bei der Erschütterung der Quecksilbersäule Lichterscheinungen auftreten, die elektrischer Natur sind. Außerdem wurde von Guericke zuerst auch die räumliche Ausbreitung des elektrischen Zustandes entdeckt, worüber später von dem Engländer Stephen Gray weitere eingehende Beobachtungen angestellt wurden, und es hat derselbe überhaupt erst die Erscheinung der elektrischen Fortpflanzung zu klarer Erkenntnis gebracht, indem er gute und schlechte Leiter unterschied. Auch gelangte derselbe durch die Wahrnehmung, daß eine volle und eine hohle Metallkugel bei gleichem Durchmesser mittels derselben Elektrizitätsmenge gleich stark elektrisch werden, zu der Ansicht, daß die Wirkung der Elektrizität sich nur auf der Oberfläche der leitenden Körper verbreite, und endlich hat derselbe auch schon auf die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung zwischen Elektrizität und Magnetismus hingewiesen.

Die vierte Epoche beginnt 1733 mit der vom französischen Physiker Dufay gemachten Entdeckung der Verschiedenheit des elektrischen Zustandes, welche Verschiedenheit sich durch Anziehung und Abstoßung äußert und wonach der Unterschied zwischen Glaselektrizität und Harzelektrizität zuerst von dem Genannten aufgestellt wurde. Trotzdem blieb die Erkenntnis der elektrischen Polarität demselben noch verschlossen.

Johann Heinrich Winkler, von 1750—1777 Professor der Physik in Leipzig, verbesserte die Elektrisiermaschine durch Anbringung eines gepolsterten Reibkissens. Er stellte die Hypothese auf, daß die Elektrizität ein die Körper durchdringendes Medium und ähnlich dem Lichtäther sei; ferner stellte er viele Versuche mit Entzündung brennbarer Körper durch den elektrischen Funken an.

Im Jahre 1745 entdeckte der Dekan und Prälat v. Kleist zu Kammin in Pommern das Prinzip der Verstärkungsflasche, oder fälschlich so genannten Leydener Flasche,

mit der alsdann im Laufe der Zeit viele Versuche angestellt wurden, die für die Theorie der statischen Elektrizität sehr förderlich waren.

Mittels dieser Kleistschen Flasche fand der oben genannte Professor Winkler, daß man die elektrische Ladung durch einen Draht auf größere Entfernungen übertragen und selbst durch Wasser leiten könne, welche Versuche durch Le Mounier in Paris noch weiter ausgedehnt wurden.

Fünfte Epoche, eingeleitet durch Benjamin Franklin, dessen weiteres Eindringen in das Wesen der elektrischen Erscheinungen. Es wurde erkannt, daß zwei elektrisierte Körper einander anziehen, wenn ihr elektrischer Zustand ungleichartig ist, und einander abstoßen, wenn ihr elektrischer Zustand gleichartig, und außerdem unterschied er nicht bloß die Polarität (oder das Zeichen + oder —) des elektrischen Zustandes, sondern auch dessen Größe, d. i. die Intensität der elektrischen Erregung. Franklin erklärte die Erscheinungen, die mittels der Kleistschen Flasche hervorgerufen werden können, durch das Auftreten der + und —-Elektrizität an der inneren und äußeren Fläche der Flasche und stellte die auf dem gleichen Prinzip beruhende Franklinsche Tafel her. Er erklärte die elektrische Wirkung der Spitzen und erfand mit Bezug darauf den Blitzableiter. Er ist der Begründer der unitarischen Hypothese in der Elektrizitätslehre, während seine Zeitgenossen, die Franzosen Dufay und Coulomb, die dualistische Hypothese aufstellten. Der Unterschied zwischen beiden Hypothesen besteht im folgenden: Nach der unitarischen Hypothese Franklins wird nur die positive Elektrizität als beweglich betrachtet, während der wägbaren (ponderabeln) Masse der Körper neben der Gravitationskraft auch die sämtlichen Eigenschaften eines negativ elektrischen Körpers zugeteilt werden, indem man dessen Elemente fest mit der negativen Elektrizität verbunden denkt. Nach der Dufay-Coulombschen dualistischen Hypothese werden dagegen zwei, in den Körpern bewegliche elektrische Fluida (ein positives und ein negatives

Fluidum) angenommen. Bei alledem kam man damals nicht über die Kenntnis der elektrischen Erregung durch Reibung hinaus.

John Canton zu Gloucester in England erfand in der Zeit von 1760 bis 1770 das noch gegenwärtig benutzte Elektroskop, mit an Seidenfäden hängenden Holundermarkkügelchen, und stellte damit Versuche über die atmosphärische Elektrizität an. Noch in dieselbe Epoche fällt das Auftreten von Charles Augustin Coulomb (geb. 1736 zu Angoulême, gest. 1806 zu Paris). Er benutzte die Torsionswirkung eines Seidenfadens zuerst zur Herstellung einer Boussole, um den magnetischen Meridian genau zu bestimmen, und dann die Torsion eines feinen Silberdrahtes zur Herstellung der Drehwage, womit er die Gesetze der Anziehung und Abstoßung studierte. Er fand, daß eine elektrische Masse e, die von einer andern elektrischen Masse e' um r entfernt ist, durch eine Kraft $\frac{e\,e'}{r^2}$ angezogen oder abgestoßen wird. Von größter Wichtigkeit sind ferner die Untersuchungen, welche Coulomb 1787 bis 1788 über die Verteilung der Elektrizität über zwei sich berührende Körper von verschiedener Gestalt anstellte und damit das Verhältnis der elektrischen Dichtigkeit bestimmte.

In die sechste Epoche fällt die Entdeckung der Berührungselektrizität durch Galvani und deren richtige Deutung und praktische Anwendung durch Volta. Über Galvanis Entdeckung (1790) des Zuckens von Froschschenkeln durch elektrische Einwirkung schwebt insofern ein Dunkel, als nicht festgestellt ist, ob diese Entdeckung das Ergebnis absichtlich angestellter Versuche ist oder durch einen Zufall herbeigeführt wurde. Galvani erklärte die Erscheinung, indem er den Froschschenkel als Kleistsche Flasche auffaßte, wobei der Nerv die Wirkungsweise der inneren Belegung, die Muskeln die der äußeren Belegung und der äußere Rand des Nervs die trennende Glasschicht vertrete. Der Professor Reil in Halle trat dieser Ansicht

mit der Bemerkung entgegen, daß die Erscheinung nur einer großen Reizbarkeit der Nerven durch die Elektrizität zuzuschreiben sei, deren Ursache in der elektrischen Wirkungsweise der Metalle, die dabei mit dem Nerv in Berührung gebracht wurden, zu suchen sei. Hiermit ist Reil als der Vorläufer Voltas zu betrachten.

Volta prüfte Galvanis Entdeckung in streng wissenschaftlicher Weise und stellte den Satz auf: Nerven und Muskeln haben stets Elektrizität in sich, aber dieselbe befindet sich im Gleichgewicht; erst durch die Berührung mit dem Metall wird dieses Gleichgewicht gestört und dann durch die Leitungsfähigkeit der Metallverbindung zwischen Nerv und Muskel in der Form einer Entladung wieder hergestellt. Weitere Versuche führten ihn aber darauf, daß wenigstens in manchen Fällen nur eine elektrische Erregung der Nerven durch äußere Beeinflussung stattfinde und daß zum Gelingen des Versuchs stets zwei verschiedene Metalle, wie Blei oder Zinn einerseits, Gold, Silber oder Eisen anderseits, anzuwenden seien. Hiermit legte er den Grund zur Erkenntnis des Spannungsgesetzes. Im Anfang des Jahres 1800 stellte er die nach ihm als Voltasche Säule benannte Galvanische Batterie her. Die Voltasche Säule bestand aus abwechselnd übereinandergelegten Kupfer- und Zinkscheiben mit Zwischenlagen von Pappe oder anderem schwammartigen Material, zum Aufsaugen und Festhalten von Flüssigkeit. Ferner stellte Volta aber auch noch einen Becherapparat her, der später zur galvanischen Batterie umgeändert wurde.

Mit Voltas Apparaten stellten dann Carlisle und Nicholson Versuche über die Zersetzung des Wassers an und wiesen Sauerstoff und Wasserstoff in dem so gebildeten Gase nach.

Johann W. v. Ritter (gest. 1810 im Alter von 33 Jahren) wendete die Voltasche Säule zum Niederschlagen von Kupfer an und ist danach als der eigentliche Entdecker der Galvanoplastik anzusehen.

Gleichzeitig mit Ritter beschäftigte sich Gilbert (geb. 1769 in Berlin), Professor der Physik in Leipzig und Begründer der später unter Poggendorffs, dann unter Wiedemanns Namen erscheinenden „Annalen“ mit Untersuchungen bezüglich der Voltaschen Säule, ebenso Christian Heinrich Pfaff (geb. 1773 in Stuttgart), Professor der Physik in Kiel. Der letztere erkannte zuerst (1801), daß bei Vergrößerung der Platten der Säule eine verstärkte Wirkung auftrete, die aber nicht von einer Veränderung der Spannung oder Polarität, sondern von einer Abänderung der Geschwindigkeit des Stromes herrühre; ferner wies er die Wärmewirkung des Stromes nach.

Die siebente Epoche wurde durch den Dänen Oersted angebahnt, indem derselbe die Wechselwirkung zwischen Elektrizität und Magnetismus durch seine hochwichtige Entdeckung feststellte, daß der durch einen Leitungsdraht fließende elektrische Strom eine Magnetnadel senkrecht zu der durch die Stromrichtung und den Mittelpunkt der Nadel gedachten Ebene zu stellen sucht. Keine Entdeckung im Gebiete der Physik fand wohl allgemeinere und regere Teilnahme, als die Oerstedsche, und die bedeutendsten Physiker der damaligen Zeit bemühten sich, in das durch den Oerstedschen Fundamentalversuch noch immer nicht völlig aufgeklärte Geheimnis des Zusammenhanges zwischen den elektrischen und magnetischen Kraftwirkungen noch weiter einzudringen. Zunächst gelang dies dem Franzosen Ampère, welcher die Oerstedschen Erfahrungen von einem allgemeineren Gesichtspunkte auffaßte und das gegenseitige Verhalten elektrischer Ströme zum Gegenstand seiner Untersuchungen machte. Er gelangte dadurch zu dem wichtigen Resultate, daß die Elektrizität (oder — nach der dualistischen Anschauungsweise — die Elektrizitäten) auch im Zustande der Bewegung, d. h. im Zustande von elektrischen Strömen nach einem gewissen Gesetze anziehend (attraktiv) und abstoßend (repulsiv) auf einander einwirken, wie dies von der statischen oder im Spannungszustande befindlichen Elektrizität geschieht. Auf

diese Thatsache hin begründete Ampère eine Theorie, nach welcher die Erscheinungen des Magnetismus auf molekulare elektrische Ströme zurückgeführt werden, oder wodurch sich wenigstens die Wechselwirkungen zwischen Elektrizität und Magnetismus auf einfache Weise erklären lassen.

Gegen Ende des Jahres 1824 beobachtete Arago in Paris die Erscheinungen des von ihm so genannten Rotationsmagnetismus, indem er fand, daß eine schwingende Magnetnadel durch Annäherung einer Metallfläche rasch zur Ruhe gebracht und wiederum durch Annäherung einer rotierenden Metallscheibe in Schwingungen versetzt werden konnte. So häuften sich Thatsachen auf Thatsachen im Gebiete der Elektrizitätswissenschaft, zwischen denen aber noch das verknüpfende Band fehlte.

Die achte Epoche begann mit der Entdeckung des wichtigen Gesetzes von dem Abhängigkeitsverhältnis zwischen elektromotorischer Kraft und elektrischem Strom, welches nach seinem Entdecker als das Ohmsche Gesetz bezeichnet worden ist. Durch dieses 1827 entdeckte Gesetz wird das Wesen des elektrischen Stromes charakterisiert und dasselbe gab die Grundlage ab für die nach einigen Jahrzehnten darauf emporwachsende Elektrotechnik. Ohm kam auf dieses Gesetz, indem er sich Jahre hindurch eifrig mit der Untersuchung der elektrischen Leitungsfähigkeit der Metalle beschäftigte. Er erkannte hierbei, daß die elektrische Kraft einer galvanischen Kette gleich nach Schluß derselben am schnellsten abnimmt und endlich zu einem Minimum wird, und daß sie nach Öffnen erst nach einiger Zeit ihre ursprüngliche Kraft wieder erhält. Hiermit erkannte er die sogenannte variable Periode, das heißt die Zeit, welche der Strom infolge der Selbstinduktion des äußeren Stromkreises braucht, um seine konstant erscheinende Wirkung anzunehmen. Er führte den Ausdruck „elektrisches Gefälle“ ein, womit er die Differenz der Spannungen an zwei um die Länge „Eins“ von einander entfernten Punkten des elektrischen Leitungsdrahtes bezeichnete. Diese Länge setzte er einem dem Strome ent=

gegentretenden Widerstande des Leiters vom Querschnitt Eins äquivalent. In einer 1827 erschienenen Monographie „Die galvanische Kette“ stellte er sein Gesetz in der allgemeinsten Form auf

$$i = \frac{a}{w},$$

worin i die Stromstärke, a das Gefälle und w den Leitungswiderstand bezeichnet. Dieser Widerstand ist demnach durch die Drahtlänge l, den Drahtquerschnitt q und den reziproken Wert des spezifischen Widerstandes α, oder durch das spezifische Leitungsvermögen λ des Materials bestimmt, so daß also $w = \alpha \frac{l}{q}$ oder $\frac{l}{\lambda q}$ ist.

Unter die Physiker, welche die Elektrizitätswissenschaft durch Experimentaluntersuchungen förderten, gehört an erster Stelle Michael Faraday (geb. 1791 zu Newington Butts bei London).

In den dreißiger Jahren wurden die bei Elektromagneten auftretenden Gesetze von Lenz, Jacobi und Dub untersucht und der erstere stellte das nach ihm benannte Gesetz auf, wonach die magnetische Kraft unterhalb der Grenzen der magnetischen Sättigung des Materials der erregenden elektrischen Stromstärke proportional ist.

Unter den deutschen Förderern der Elektrizitätslehre ist Wilhelm Weber (geb. 1754) an die Spitze zu stellen. Insbesondere untersuchte derselbe die schon von Faraday in ihren Wirkungen entdeckte unipolare Induktion und stellte deren Gesetze fest. Dann beschäftigte er sich mit Untersuchungen über das Ampèresche elektrodynamische Gesetz, das sich auf die gegenseitige Anziehung und Abstoßung gekreuzter Ströme bezieht. Später waren seine Bemühungeu auf die Erforschung des Erdmagnetismus gerichtet, die er in Verbindung mit dem berühmten Mathematiker Gauß durchführte und deren Ergebnisse in epochemachenden Abhandlungeu niedergelegt wurden. Zur Nachweisung der

induzierenden Wirkung des Erdmagnetismus stellte er sein berühmtes Instrument, das Induktions-Inklinatorium, her, bei welchem ein aus mehrfachen Windungen von Kupferdraht bestehender Ring, in dessen Mitte eine mit einem Dämpfer versehene Magnetnadel angebracht ist, um eine vertikale Achse in rasche Rotation versetzt wird. In dem Ringe werden dadurch vom Erdmagnetismus elektrische Ströme induziert, die auf die Magnetnadel ablenkend einwirken. Aus dieser Ablenkung kann auf die Größe der Vertikalkomponente des Erdmagnetismus geschlossen werden. Durch diese Versuche wurde Weber auf die Herstellung der Rotationsinduktoren geführt. Hierauf folgten drei wichtige Arbeiten über unipolare Induktion, die Messung der Stromstärke mittels der Tangentenboussole und die Bestimmung des elektrochemischen Äquivalents des Wassers. Die weiteren Arbeiten Webers beziehen sich auf magnetische Untersuchungen, durch welche er die Ampèresche Theorie von den magnetischen Molekularströmen bestätigt fand. Zur Messung der magnetischen Wirkungen erfand er das elektromagnetische Dynamometer mit bifilar aufgehängter Drahtrolle. Mit diesem feinen Instrumente kam er auf das wichtige Ergebnis, daß für die elektrodynamische Fernewirkung dieselben Gesetze, wie für die magnetische Fernewirkung gelten. Hierauf ging Weber zu Untersuchungen der Volta-Induktion über. Hier prüfte er mittels seines Dynamometers die von dem Mathematiker Franz Ernst Neumann (geb. 1798) aufgestellten Induktionsgesetze und entdeckte neue wichtige Gesetze dazu.

Die dadurch gewonnene Erkenntnis benutzte der rastlose Forscher alsdann zu bis dahin noch mangelnden genauen Messungen von elektromotorischer Kraft, Stromstärke und Widerstand. Vor allem fehlte es noch an einem allgemeinen Widerstandsmaß. Zwar hatte schon im Jahre 1846 Jacobi in Petersburg ein solches Maß als „Jacobische Einheit“ in der Form eines Kupferdrahtes von bestimmten Abmessungen hergestellt, aber dieses Maß erwies sich als

sehr unzuverlässig. Weber war es bereits früher gelungen, das Maß der Stromstärke absolut, d. h. in magnetischen Einheiten, zu bestimmen und so kam er darauf, die Größe davon durch Induktionsströme, insbesondere durch den des Erdmagnetismus zu bestimmen, indem man nach der von ihm aufgestellten Theorie die Größe der von einem Magnet auf einer bewegten Leiter ausgeübten elektromotorischen Kraft berechnen kann.

Schließlich bleibt hier noch anzuführen die Entdeckung des Gesetzes der Erhaltung der Energie, dessen hauptsächliche Grundlage in dem von Julius Robert Mayer 1842 entdeckten mechanischen Wärmeäquivalent gegeben wurde. Dieses auch für die Elektrizitätslehre hochwichtige Prinzip wurde dann von Helmholtz mathematisch formuliert und auf das Gebiet der gesamten Naturwissenschaften ausgedehnt. Helmholtz wies nach, daß in einem durch lebendige Kraft, das ist durch kinetische Energie wirksamen Massensystem stets die Summe aus den vorhandenen lebendigen Kräften und den Spannkräften konstant ist.

Bezüglich der Entwickelung der Elektrotechnik ist folgendes zu bemerken. Als erstes Beispiel der praktischen Anwendung der Elektrizitätslehre ist die Erfindung des Blitzableiters durch Benjamin Franklin (1753) aufzuführen. Zu zweitnächst ist die Erfindung der galvanischen Säule durch Volta (1800) zu nennen, womit zuerst ein Mittel zur Verstärkung der Wirkung der Kontaktelektrizität gegeben war. Hierauf folgte Aragos Entdeckung der magnetisierenden Wirkung des galvanischen Stromes (1824), woran sich die Konstruktion der ersten Elektromagneten durch den Engländer Sturgeon schloß, und danach kam Faradays Beobachtung der elektrischen Erregung durch magnetische Kraftwirkung (1831), womit der Technik durch die Darbietung des Elektromagnetismus und der Magnetelektrizität ein weites Feld zur Konstruktion der verschiedenartigsten elektrischen Apparate eröffnet war.

Auf die Ablenkung der Magnetnadel durch den wechselnden elektrischen (galvanischen) Strom, d. i. auf den Elektromagnetismus basierte die Erfindung des ersten brauchbaren elektrischen Telegraphen von Gauß und Weber in Göttingen (1833) und gleichzeitig von Baron Schilling-Canstadt in Petersburg, worauf (1837) Steinheil in München einen anderen elektrischen Telegraphen herstellte, welcher auf das Prinzip der momentanen Magnetisierung eines Eisenkörpers durch einen periodisch unterbrochenen elektrischen Strom, d. i. ebenfalls auf den Elektromagnetismus, begründet war. Auf der Benutzung desselben Prinzips beruhten auch die elektrischen Uhren, welche 1839 von Steinheil in München, 1840 von Wheatstone in London und 1849, zum ersten Male in größerem Umfange, von Stöhrer in Leipzig zu dem Zwecke konstruiert wurden, von einer Normaluhr aus in einem größeren Umkreise eine beliebige Anzahl Uhren mittels des elektrischen Stromes ganz gleichmäßig zu betreiben. Die elektrische Telegraphie, unbestreitbar eine deutsche Erfindung, erhielt in Amerika ihre Vervollkommnung durch Morses Schreibtelegraphen, der 1843 die erste Anwendung im großen fand. Die Engländer Cooke, Wheatstone, Mapple und Barlow, die Franzosen Bréguet, Froment und Reynard, die Deutschen Leonhard, Drescher, Stöhrer und Siemens beschäftigten sich in der Zeit von 1836 bis 1860 mit der Verbesserung des elektrischen Zeigertelegraphen; ferner wurden elektrische Drucktelegraphen erfunden, welche die Telegramme direkt mittels Farbe mit gewöhnlichen Buchstaben auf Papier druckten, so daß die Schrift für jedermann lesbar war, während die Morsesche, aus Strichen und Punkten bestehende Zeichenschrift nur dem Eingeweihten verständlich ist. An diese Erfindungen schließt sich die des Telephons von Ph. Reis (1860) und von Abraham Bell (1877) an.

Eine Zeitlang lebte man der Hoffnung, den Elektromagnetismus mit Erfolg als Triebkraft benutzen zu

können, und in der That gelang es Jacobi (1839) in Petersburg auf der Newa ein Boot zu treiben, später setzte Stöhrer in Leipzig Drehbänke und andere leichtbetreibbare Maschinen auf dieselbe Weise in Bewegung, und Wagner in Frankfurt a. M. bemühte sich ernstlich, die Eisenbahnlokomotive anstatt mit Dampf durch Elektrizität zu betreiben, allein bald stellte sich das Unpraktische dieser Bestrebungen heraus.

An die Stelle der durch galvanische Batterien betriebenen Elektromotoren traten die magnetelektrischen Maschinen als Elektrizitätsgeneratoren und damit hatte die Magnetelektrizität ihre praktische Bedeutung erlangt, indem durch die bezüglichen Apparate die kostspieligen und umständlichen galvanischen Batterien als Stromerzeuger verdrängt wurden. Anstatt durch chemische Wirkung wurde nunmehr mit Hilfe der magnetelektrischen Maschinen der elektrische Strom durch mechanische Arbeit, d. i. durch die auf eine Kurbel übertragene Dreharbeit, sei es mittels Hand oder mittels Elementarkraft, hervorgerufen. Hiermit war das bedeutungsvolle Mayersche Grundprinzip von der Äquivalenz der in Kausalverknüpfung stehenden Kraftwirkungen wiederum in helles Licht gestellt.

Die erste magnetelektrische Maschine wurde 1832 von Pixii in Paris konstruiert; mit deren Verbesserung beschäftigten sich eine große Anzahl bedeutender Elektriker.

Mit der Herstellung der magnetelektrischen Maschine war der Einführung der elektrischen Beleuchtung die Bahn gebrochen, denn obschon Humphry Davy bereits 1822 die Erzeugung des elektrischen Lichtes entdeckt hatte, so fand dessen praktische Verwendung doch noch an der Notwendigkeit ein Hemmnis, dazu teure und umständliche galvanische Batterien benutzen zu müssen.

Größere und daher auch zur Erzeugung kräftiger Ströme brauchbare magnetelektrische Maschinen führte zuerst Stöhrer in Leipzig in den Jahren 1846—1850 aus. Noch stärkere Maschinen konstruierte nach dem Genannten

der Engländer Holmes und die französische Gesellschaft l'Alliance zum Zwecke der elektrischen Lichterzeugung auf Leuchttürmen. Ein wesentlicher Fortschritt in der Konstruktion dieser Maschinen wurde 1857 von Dr. Werner Siemens in Berlin gemacht, indem es demselben gelang, die magnetelektrische Wirkung durch seinen **H**-Anker viel besser auszunutzen, als dies bisher geschah.

Durch die Kombination einer kleinen magnetelektrischen Maschine mit einer großen elektromagnetischen Maschine wurde abermals ein bedeutender Fortschritt in der Herstellung der Elektrogeneratoren gewonnen, mit welchen der Engländer Wilde 1866 vor die Öffentlichkeit trat. Das Prinzip dieser Maschine liegt darin, daß es möglich ist, mittels eines verhältnismäßig schwachen elektrischen Stromes sehr starke Elektromagnete zu erzeugen und diese wiederum zur Stromerweckung zu benutzen.

Im Jahre 1863 erfand der Professor Pacinotti in Pisa eine besondere Art von Drahtbewickelung für einen ringförmigen Elektromagnet, den er als Armatur für einen Elektromotor verwendete und als „Transversal-Elektromagnet" bezeichnete. In Bezug auf diese Ringarmatur erklärte der Genannte, daß dieselbe auch für magnetelektrische Maschinen anwendbar sei.

Endlich trat im Jahre 1867 Werner Siemens in Berlin mit seiner dynamoelektrischen Maschine hervor, mit welcher ein neu entdecktes Prinzip zur wirksamsten Geltung gebracht und eine vollständige Umwälzung in der Konstruktion der Elektrogeneratoren herbeigeführt wurde. Mittels dieser Maschine gelang es, die permanenten Magnete zur Stromerzeugung ganz unnötig zu machen, indem der genannte Erfinder zu der Erkenntnis gekommen war, daß auch der kleinste Keim der magnetischen Kraft, welcher selbst in dem für gewöhnlich als ganz unmagnetisch geltenden weichen Eisen schlummert, genügend ist, um in der Wechselwirkung von Magnetelektrizität und Elektromagnetismus mittels einer gewissen Drehkraft eine dieser

Drehkraft und der Konstruktion der Maschine entsprechende Maximalleistung in elektrischer Energie zu erhalten.

Mit der Erfindung der dynamoelektrischen Maschine war die Herstellung kräftiger Elektrogeneratoren außerordentlich vereinfacht worden und damit der technischen Verwendung der Elektrizität die breiteste Bahn gebrochen.

Auch auf anderen Gebieten der Elektrotechnik, insbesondere in der Vervollkommnung der Telegraphenapparate, in der Ausbildung der elektrischen Meßmethoden, in der Herstellung von Leitungskabeln, in der Vervollkommnung der elektrischen Beleuchtung, in der Herstellung der ersten betriebsfähigen elektrischen Eisenbahn, in der Ausbildung der Elektrolyse ꝛc. erwarb sich Werner Siemens bedeutendes Verdienst.

Faradey hat sich durch seine für die Elektrizitätslehre und Elektrotechnik grundlegenden Experimentaluntersuchungen hohes Verdienst erworben. Er wies nach, daß die elektrischen Ladungen meßbare Größen sind, daß die Gesamtladung eines elektrisierten Körpersystems unveränderlich ist und daß durch Reibung auf den Körpern gleiche und entgegengesetzte Elektrizitäten entwickelt werden, die sich zu neutralisieren vermögen. Mit Bezugnahme auf die magnetischen Eisenstaubbilder führte er den Begriff der magnetischen Kraftlinien ein und stellte die Behauptung auf, daß jede dieser Kraftlinien eine geschlossene Kurve bilde, deren Weg von der magnetischen Leitungsfähigkeit der benachbarten Massen abhänge und daß die magnetischen Kraftlinien genau so wie die elektrischen Strömungslinien in einem geschlossenen Stromkreise anzusehen seien. Er erkannte auch das Vorhandensein einer der elektromotorischen Kraft in einem elektrischen Stromkreise ähnlichen Kraft mit Bezug auf den magnetischen Stromkreis. Er vertrat die Ansicht, daß die elektrischen und magnetischen Wirkungen durch den Spannungs- oder Bewegungszustand eines Übertragungsmittels (des Äthers) herbeigeführt würden und er sah in diesen magnetischen

Kraftlinien elastische, durch das übertragende Medium sich ausspannende, den für sie am leichtesten zu durchdringenden Raum wählende Fäden, die, jenachdem sie gleich oder entgegengesetzt gerichtet sind, abstoßend oder anziehend auf einander einwirken. Für die Bewegung eines elektrischen Leiters in einem magnetischen Kraftfelde stellte er das Induktionsgesetz auf, wonach die Veränderungen des magnetischen Kraftflusses eine entsprechende Veränderung der elektrischen Erregung des beeinflußten Leiters bewirken. Er zeigte, daß man mittels einer zwischen entgegengesetzten Magnetpolen rotierenden Kupferscheibe einen elektrischen Strom erhalten könne, und indem er dabei einen Elektromagnet verwendete, stellte er die erste Dynamomaschine her. Er entdeckte den Diamagnetismus. Er begründete die Elektrolyse, indem er deren Hauptgesetze feststellte.

Wir haben nun noch einen Blick auf die Entwicklung der elektrischen Beleuchtung zu werfen, die mit der Entwicklung der dynamoelektrischen Maschinen auf das engste verknüpft ist. Das elektrische Licht gewann eine praktische Bedeutung erst mit dem von Foucault in Paris im Jahre 1848, sowie gleichzeitig von den Engländern Staite und Petrie erfundenen elektrischen Lichtregulator, wobei der Strom selbst zum Regulieren des Lichtbogens benutzt wird. Die erste wirklich brauchbare elektrische Lampe rührt aber von dem Franzosen Archereau her, der auch die ersten brauchbaren Lichtkohlenstäbe herstellte. Bei der Archereauschen Lampe wird die untere Kohle durch eine über Rolle geleitete Gewichtschnur gegen die obere Kohle leicht angedrückt. Die Eisenhülse, welche die untere Kohle hält, geht durch eine vom Strom durchflossene Drahtspule, die durch ihre magnetische Wirkung den unteren Kohlenträger festhält, so daß der Gewichtszug außer Wirkung kommt. Auf diese Weise wird der elektrische Lichtbogen zwischen den beiden Kohlenspitzen hergestellt und durch das Abbrennen dieser Spitzen ein wachsender Widerstand zwischen den Kohlen im Lichtbogen hergestellt, wodurch der Strom

geschwächt und somit das Gewicht wieder wirksam wird, so daß es die untere Kohle emporzieht, somit die Spannung im Lichtbogen zwischen gewissen Grenzen erhalten bleibt und das Fortbestehen des Lichtbogens gesichert ist. Noch einfacher, weil ohne jeden Bewegungsmechanismus, sind die von Jablochkoff in Paris 1876 erfundenen elektrischen Kerzen mit zwei nebeneinandergestellten, von einander isolierten Kohlenstäben, wobei jedoch zum Betrieb Wechselstrom nötig ist, um ein gleichförmiges Abbrennen der Kohlenstäbe zu erhalten. Der größte Erfolg in der Herstellung des Bogenlichtes wurde jedoch mit der von Werner Siemens und Hefner-Alteneck herrührenden Bogenlampe erzielt. Neben dem Bogenlicht trat dann noch das für Lichtverteilung viel besser geeignete Glühlicht auf. Die erste brauchbare Glühlampe wurde vom Amerikaner Edison ums Jahr 1879 erfunden. Viele andere derartige Lampenkonstruktionen folgten nach, von denen besonders die von Swan in London, Siemens in Berlin und Müller in Hamburg zu nennen sind. Für den Betrieb seiner Glühlampen konstruierte Edison auch, gestützt auf die von Siemens und Hefner-Alteneck zuerst gebaute Trommelmaschine, eine für Großbetrieb geeignete Gleichstrommaschine, die der damals herrschenden, ebenfalls von Siemens zuerst ausgebildeten Wechselstrommaschine Konkurrenz machte. Großes Verdienst um die Elektrizitätsverteilung erwarb sich Edison auch durch die Ausbildung der Parallelschaltung für seine Glühlampe, die von da an die bisher für Wechselstrombogenlampen angewendete Reihenschaltung mehr und mehr verdrängte, indem dieselbe der Parallelschaltung untergeordnet und mit derselben kombiniert wurde. Die Parallelschaltung erhielt in den Mehrleitersystemen eine großartige, für die Städtebeleuchtung geeignete Ausbildung und die als Elektrizitätserzeuger für den Parallelschaltungsbetrieb benutzten Gleichstrommaschinen wurden zur größten Vollkommenheit gebracht, wobei der Firma Siemens & Halske in Berlin der Ruhm gebührt, zuerst solche Maschinen als Innenpolmaschinen in

größten Dimensionen und von ausgezeichneter Leistungsfähigkeit gebaut zu haben. Neben dieser Firma that sich insbesondere auch noch Schuckert in Nürnberg im Bau von Ringmaschinen hervor. Neuerdings findet die eine Zeitlang zur Seite gedrängte Wechselstrommaschine wieder besondere Beachtung, indem sich dieselbe in Verbindung mit Transformatoren für Fernleitung besonders vorteilhaft erweist. Aber gleichzeitig hat auch die Gleichstrommaschine in den Akkumulatoren einen Beistand erhalten, der ihre Anwendung bequemer und ökonomischer macht.

Das neueste Stadium der Elektrotechnik wird durch das eingehende Studium des Wechselstromes und von dessen Verwendung mittels kombinierter, in ihren Wirkungsphasen gegen einander verschobener und somit ein sogenanntes Drehfeld bildender Wechselströme gekennzeichnet. In dieser Beziehung hat eine große Reihe von Elektrotechnikern sich bedeutende Verdienste erworben. So Gaulard und Gibbs als diejenigen, welche zuerst nachwiesen, daß man mittels Induktionsapparate (sogenannter Sekundärgeneratoren oder Transformatoren) die elektrische Energie vorteilhaft auf größere Entfernungen verteilen kann. Um die Ausbildung dieser Transformatoren machten sich dann Zipernowski, Dèri und Bláthy verdient, deren Apparate von der Firma Ganz & Co. in Budapest in Verbindung mit anderen Verbesserungen im Wechselstrombetrieb ausgeführt wurden. Bezüglich der Anwendung des Wechselstromes, insbesondere des sogenannten Mehrfachphasenstromsystems, haben sich Ferraris, Nicola Tesla, L. E. L. Brown und Dolivo-Dobrowolski einen Ruf erworben. Man will damit die Elektromotoren möglichst vereinfachen, indem Kommutatoren, Schleifringe und Bürsten beseitigt werden. Vor allem strebt man aber danach, einen Apparat zu erfinden, wodurch der für Fernleitung ausgezeichnet geeignete zweiphasige Wechselstrom in wirtschaftlicher Weise in Gleichstrom umzuwandeln ist, indem man die Anwendung des

immerhin etwas komplizierten Mehrphasensystems als ein Übergangsstadium betrachtet.

Welchem System, ob dem Gleichstrom oder dem Wechselstrom, der absolute Vorzug gebührt, läßt sich zur Zeit nicht entscheiden. Wahrscheinlich hat jedes dieser Systeme seine besonderen den Umständen entsprechenden Vor- und Nachteile, so daß es der fachmännischen Entscheidung anheimzustellen ist, welches System den gegebenen Umständen am besten entspricht.

Erster Abschnitt.

Das absolute Maßsystem und die Potentialtheorie.

Erstes Kapitel.

Grundeinheiten, abgeleitete Einheiten und Dimensionen.

1. Grundeinheiten. — Als Grundeinheiten des absoluten Maßsystems gelten die physikalischen Größen Raum, Masse und Zeit, wobei der Raum durch eine Länge, die Masse durch ein Gewicht und die Zeit durch einen kleinen Bruchteil des mittleren Sonnentages ausgedrückt wird. Mit Bezug auf die Messung magnetischer und elektrischer Größen wurden von Gauß und Weber seinerzeit Millimeter, Milligramm und Sekunde gewählt. Diese für wissenschaftliche Untersuchungen wohlgeeigneten Maßeinheiten sind für die praktischen Zwecke der Elektrotechnik mit Rücksicht auf Länge und Masse zu klein, weshalb von den Elektrikern ein auf Centimeter, Gramm und Sekunde begründetes Maßsystem angenommen wurde, das kurz als das System C. G. S. bezeichnet wird. Die Einheiten der Grundmaße werden wie folgt bestimmt:

Das Centimeter (C.) ist angenähert der billionste Teil des Erdquadranten, oder genau der hundertste Teil des als

Eichmaß hergestellten und in der internationalen Eichmaßstelle zu Sèvres (Frankreich) aufbewahrten Metermaßes.

Das Gramm (G.) wird dargestellt durch die Masse eines Kubikcentimeters destillierten Wassers bei seiner größten Dichtigkeit, das ist bei +4° Celsius. Genau ist das Gramm der tausendste Teil des als Eichmaß der Masse zu Sèvres aufbewahrten Kilogramms.

Die Sekunde ist der 86400ste Teil des mittleren Sonnentages. Das auf diese willkürlich gewählten aber durch Eichmaße fest bestimmten Grundmaße begründete Maßsystem wird als das „absolute Maßsystem" bezeichnet. Die Symbole der Grundmaßeinheiten sind für Länge [L], für Masse [M] und für Zeit [T].

Man bezeichnet das somit gewählte internationale Maßsystem als das Centimeter-Gramm-Sekunden-System oder kurz als das C. G. S.-System.

Die Grundmaße sind, weil willkürlich gewählt, von einander unabhängig; die abgeleiteten Maße dagegen stehen in gegenseitiger Abhängigkeit, so z. B. die Geschwindigkeit als eine von der Zeit abhängige Weglänge, die Kraft als eine von Masse und Beschleunigung abhängige Größe 2c.

2. **Abgeleitete Einheiten und Dimensionen.** — Unter abgeleiteten Einheiten versteht man die durch Potenzierung sowie durch Verbindung im Produkt beziehungsweise Quotienten der Grundeinheiten dargestellten mechanischen oder physikalischen Größen.

Unter der Dimensionsformel einer mechanischen oder physikalischen Größe versteht man einen Ausdruck, in welchem diese Größe durch die sie charakterisierende Kombination der Grundeinheiten dargestellt ist. So wird z. B. die Fläche durch die zweite Potenz der Länge $[L^2]$, das Volumen als dritte Potenz der Länge $[L^3]$ dargestellt. Ferner gilt für die Geschwindigkeit als Quotient aus Weglänge durch Zeit die Dimensionsformel $[LT^{-1}]$ und für Beschleunigung als Quotient aus Geschwindigkeit durch Zeit die Dimensionsformel $[LT^{-2}]$. Für den Begriff der Kraft als Produkt aus

Masse mal Beschleunigung gilt die Dimensionsformel $[MLT^{-2}]$ und für den Begriff der Arbeit als Produkt aus Kraft mal Weg, sowie auch für den Begriff der lebendigen Kraft oder kinetischen Energie gilt die Dimensionsformel $[ML^2T^{-2}]$.

3. Übergang von einem Maßsystem zu einem andern Maßsystem. — Will man unter Umständen andere als die im C. G. S.-System benutzten Maßeinheiten, also etwa anstatt des Centimeters das Meter und anstatt des Grammes das Kilogramm in Anwendung bringen, so erhält man beispielsweise für den Begriff der Arbeit A den Ausdruck

$$A = 100 \times 1000\ [LM^2T^{-2}],$$

das ist eine 100 000mal so große Arbeit als nach dem C. G. S.-System.

Wollte man für die Messung der Geschwindigkeit als Maßeinheiten etwa das Meter und die Stunde (3600 Sekunden) einführen, so erhielte man für die Geschwindigkeit v den Ausdruck

$$v = \frac{100}{3600}\ [LT^{-1}],$$

das ist $^1/_{36}$ der im C. G. S.-System angenommenen Grundmaßeinheit der Geschwindigkeit. Die Dimensionsformeln gestatten also in bequemer Weise den Übergang von einem beliebigen Maßsystem zum andern. Wenn in der abgeleiteten Größe eine Grundeinheit in der nten Potenz vorkommt, so ändert sich die abgeleitete Größe im Verhältnis k^{-n}, sobald die Grundeinheit im Verhältnis k geändert wird. Demnach ändert sich in diesem Falle der Zahlenwert der Größe im Verhältnis k^{-n}. Die Zahl, welche beispielsweise die Geschwindigkeit $v = \frac{l}{t}$ (Weglänge durch Zeit) darstellt, wird bei dem Übergange vom Millimeter-Milligramm-Sekunden-Systeme zum C. G. S.-System im Verhältnis von 10^{-1}, beim Übergange von der Sekunde zur Minute im Verhältnis von 60^{+1} geändert ꝛc.

Die Dimensionen gestatten nicht nur die Homogenität der Formeln zu kontrollieren, sondern sogar auch die Form einer Funktion vorher zu sehen, sobald man die physikalischen Größen kennt, welche die Funktion bilden. Beispielsweise habe man bei solchen Versuchen erkannt, daß die Geschwindigkeit der Fortpflanzung einer Wellenbewegung in einem Mittel von dessen Elastizitätsmodul und dessen Dichte abhängig sei.

Folglich ist die Geschwindigkeit v die Funktion der Elastizität e und der Dichte d, also

$$v = \varphi\,(e, d).$$

Um diese Funktion zu bestimmen, setzt man die Dimensionen der in dieser Gleichung enthaltenen Größen in die Gleichung ein. Man erhält dadurch

$$vLT^{-1} = \varphi\,(eL^{-1}MT^{-2}, dL^{-3}M).$$

Da im ersten Gliede M fehlt, so ist zur Herstellung der Homogenität dieser Funktion erforderlich, daß M im zweiten Gliede ausgeschieden wird, was dadurch geschieht, daß man diesem Gliede die Form eines Verhältnisses giebt. Es ist dann

$$vLT^{-1} = \varphi\left(\frac{eL^{-1}MT^{-2}}{dL^{-3}M}\right) = \varphi\left(\frac{e}{d}L^2T^{-2}\right).$$

Um L und T in den beiden Gliedern auf denselben Grad zu bringen, muß das zweite Glied unter die Quadratwurzel gebracht werden. Hieraus folgt, daß v eine lineare Funktion ist von

$$\sqrt{\frac{e}{d}}.$$

Die Erfahrung zeigt auch wirklich, daß die gesuchte Beziehung ist

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}}.$$

4. Unterschied zwischen den Begriffen Energie und Kraft. — Durch die Zurückführung aller Naturkräfte auf das Maß der Schwerkraft ist es der physikalischen Forschung erst möglich geworden, von den qualitativen Eigentümlichkeiten, welche die einzelnen Erscheinungen für die Sinneswahrnehmung darbieten, ganz abzusehen. Denn durch diese Zurückführung der Naturkräfte auf die Schwere ist ein einheitlicher Standpunkt für die Beurteilung der physikalischen Erscheinungen gewonnen und deren begriffsmäßige, der Erfahrung entsprechende Überführung von der einen zur andern ermöglicht und das dazu erforderliche Verfahren der Maßbestimmung in die Hand gegeben worden. Außerdem aber ist durch die Zurückführung der Naturkräfte auf die Schwere und die Erkenntnis von deren gegenseitiger Überführung neben dem Kraftbegriff noch der für gewisse Betrachtungen höchst fruchtbare Begriff der Energie entstanden. Unter Energie versteht man nämlich die Fähigkeit zur Herbeiführung einer Ortsveränderung von Massen oder — was gleichbedeutend ist — die Fähigkeit zur Leistung von Arbeit. Diese Fähigkeit ist notwendigerweise stets selbst an bestimmte Massen gebunden, sei es dadurch, daß dieselben in einer Bewegung begriffen sind, die sie auf andere Massen zu übertragen vermögen, sei es, daß sie in eine Lage gebracht sind, in der die Schwere oder eine andere Energie eine bewegende Wirkung auf sie auszuüben strebt. Im ersten Falle wird die Energie als aktuelle oder kinetische, im zweiten Falle als potentielle oder auch als Energie der Lage bezeichnet. Kinetische Energie oder auch lebendige Kraft ist also das in Bewegung durch Geschwindigkeit als mechanische Arbeit zum Ausdruck kommende Vermögen der Arbeitsleistung einer Masse, potentielle Energie die durch die Lage, also etwa durch die Erhebung über den Erdboden, im allgemeinen durch eine Potentialdifferenz zum Ausdruck kommende Arbeitsleistung einer Masse. Es ist hierbei jedoch zu bedenken, daß sowohl die mit poten-

ticller, also von einem Orte aus durch Anziehung oder Abstoßung auf andere in ihren Bereich kommende Massen einwirkende Masse, als auch die ihre kinetische Energie durch gleichförmige Bewegung äußernde Masse im Vergleich zu einer mit veränderlicher Geschwindigkeit, das ist mit positiver oder negativer Beschleunigung begabten Masse eigentlich als relativ statische Massen zu betrachten sind, indem nur die mit veränderlicher Geschwindigkeit begabten Massen als dynamische Massen zu gelten haben. Zieht man aber bei einer Masse die Molekularschwingungen in Betracht, welche bei den Erscheinungen des Tönens, der Wärme, der Farben, der Elektrizität, des Magnetismus und der Schwere vorauszusetzen sind, so hat man alle Massen als dynamische Massen anzusehen, insofern in denselben wenigstens die Wirkung der Schwere sich äußert.

Der Begriff der Energie unterscheidet sich von dem Begriffe der Kraft wesentlich dadurch, daß, während bei der Kraftwirkung die bloße Veränderung im Bewegungszustande einer Masse in Betracht kommt, bei der Energieäußerung die Wirkung der Bewegung, also die geleistete Arbeit berücksichtigt wird.

Die Energie ist im allgemeinen die Fähigkeit einer Masse Arbeit zu leisten und die Energie eines materiellen in einem bestimmten Zustande befindlichen Systems ist der in mechanischen Arbeitseinheiten gemessene Betrag aller Wirkungen, welche innerhalb des Systems hervorgerufen werden, wenn das System aus seinem Zustande auf beliebige Weise in einen willkürlich bestimmten Nullpunkt übergeht. Da nun die Arbeit einer Kraft durch das Produkt aus Kräftgröße mal der Weglänge, auf welcher die Kraft eine Masse befördert, gemessen wird, so versteht man demgemäß unter Energie die in einer Masse oder in einem Massensysteme vorhandene Arbeitsfähigkeit. Hierbei ist noch darauf hinzuweisen, daß die Größe einer Kraft durch die Größe des Widerstandes der bewegten Masse, also durch eine

Gegenkraft zu messen ist, wobei stets das Prinzip der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung zur Geltung kommt.

Mit Bezug auf den Ursprung ist jede Kraft als das Produkt einer vorher geleisteten Arbeit zu betrachten und demnach ist eine Kraft in ihrer Gesamtheit, also beispielsweise die in gleichförmiger Bewegung sich äußernde lebendige Kraft einer Masse oder die in einer Sekundärbatterie aufgespeicherte Kraft, oder selbst auch der Druck einer ruhenden Masse als eine Energiegröße anzusehen, die sich in Arbeitsleistung äußern kann und daher auch einer Arbeitsleistung gleichwertig zu setzen ist.

5. **Zentralkraft und Potential.** — Alle in der Natur wirksamen Kräfte sind unter den Begriff der Zentralkraft zu fassen und demnach dem Newtonschen Gesetz der Gravitation unterworfen. Man hat also anzunehmen, daß jede dieser Kräfte von einem mit Energie begabten Massenmittelpunkte ausgeht, oder als Gegenwirkung aus dem mit Energie erfüllten Raume nach einem Massenmittelpunkte zurückgestrahlt wird. Insoweit der Massenmittelpunkt (man kann darunter auch den Massenmittelpunkt eines Moleküls sich denken) im Raume isoliert ist, wird die Energie in Kugelflächen, Wirkungssphären der Potentialflächen sich um den Zentralpunkt der Kraft ausbreiten. Nach dem Gesetz der Erhaltung der Energie wird die Gesamtenergie in jeder dieser Kugelflächen dieselbe Größe haben wie die Energie im Zentralpunkte der Kraftäußerung. Da nun aber diese dicht übereinander gelagerten, in allen ihren Massenteilchen in Schwingungen begriffenen Kugelflächen ihrer Größe nach der zweiten Potenz der Entfernung vom Zentralsitze der Kraftwirkung proportional sind, so wird die Arbeitsleistung in jedem Punkte oder Molekül einer solchen Fläche der zweiten Potenz der Entfernung vom Zentralsitze der Kraft umgekehrt proportional sein. Ist also diese als Radius einer Kugelfläche geltende Entfernung r, so wird die Kugelfläche durch $4\pi r^2$ Flächeneinheiten bestimmt und für jede Flächen-

einheit ist die darauf entfallende Energie größer oder das darauf entfallende Arbeitsleistungsvermögen gleich $\frac{1}{r^2}$; demnach wird die Gesamtenergie jeder dieser kugelförmigen Potentialflächen durch 4π gemessen, wobei der Radius jeder dieser Kugelflächen immer als absolute Einheit (r^0) gesetzt wird, indem man die in Betracht gezogene Kugelfläche als die äußerste ansieht und von dieser nach dem Kontrollpunkte zu in Kugelflächen von kleinerem Radius übergeht.

Betrachtet man die in einem vom Zentralpunkte aus gedachten Strahl, das ist in einer sogenannten Kraftlinie, wirksame Energie oder Arbeitsleistung, so ist diese gleich dem Produkte aus Kraft mal Weg und daher ist die im Durchschnittspunkte dieser Kraftlinie mit irgend einer der Potentialflächen wirksam zu denkende Kraft der Strahllänge, das ist der vom Zentralpunkte aus gemessenen Weglänge, umgekehrt proportional zu setzen. Diese Kraft wird das Potential genannt; nach dieser Definition kommen also einer solchen Potentialfläche in allen ihren Massenelementen oder Molekülen gleich große Potentiale zu und in den verschiedenen Potentialflächen sind die bezüglichen Potential- oder Kraftpunkte der Entfernung vom Zentralsitze der Kraft umgekehrt proportional.

6. **Dynamische Masse.** — Nach dem Newtonschen Gravitationsgesetze und der daraus von Coulomb für magnetische und elektrische Massen abgeleiteten Formel wird die in der Entfernung **r** zwischen zwei gleichen mit Energie begabten und also dynamischen Massen m als Anziehung oder beziehungsweise Abstoßung hervortretende Energieäußerung **A** bestimmt durch die Gleichung

$$A = K\frac{m^2}{r^2} \dots (1)$$

wobei K einen von dem die Energie übertragenden Medium abhängigen Koeffizienten bedeutet. Es folgt daraus zur Bestimmung der dynamischen Massengröße die Gleichung

$$m = r \sqrt{\frac{A}{K}} \ldots (2)$$

Eine dynamische Masse ist eine mit Molekularenergie begabte, auf andere Massen durch Anziehung oder Abstoßung wirksame Masse zu betrachten und daher einer mit lebendiger Kraft begabten Masse oder einer geladenen Sekundärbatterie vergleichbar, indem dadurch eine Arbeitsgröße dargestellt wird, die man nur mit einer Weglänge zu dividieren hat, um eine bezügliche Kraftgröße zu erhalten, daher repräsentiert der Ausdruck

$$\frac{m}{r} = \sqrt{\frac{A}{K}}$$

eine Kraft, der Ausdruck

$$m = r \sqrt{\frac{A}{K}}$$

eine Arbeitsgröße, die durch die Bethätigung einer Kraft erzeugt worden ist und die in ihrem relativ statischen, das ist an eine Masse gebundenen Zustande wiederum als eine Kraft betrachtet werden kann.

Läßt man in Gleichung (1) die Entfernung r um eine kleine Größe $\triangle$ r wachsen, so geht der Ausdruck $(r + \triangle r)^2$ für das Differential über in 2 r und man erhält aus Gleichung (1)

$$F = K \frac{m^2}{r^2} d\, r = K \frac{m^2}{r} \ldots (3)$$

Man erhält diese Gleichung aber auch, wenn man die Gleichung (1) mit r multipliziert, so daß also in dieser Beziehung die Gleichung (1) eine Arbeit, die Gleichung (3) aber eine Kraft darstellt, wobei aber diese Begriffe auf dynamische Massen, das ist auf molekulare Bewegungen bezogen werden.

Die Gleichung (3) giebt den Ausdruck für das Potential, das ist nach der auf S. 29 gegebenen Definition die in der Entfernung r vom Energiezentrum im Durchschnittspunkte einer Kraftlinie mit einer gedachten Potentialfläche wirksame Kraft. Der Koeffizient K ist auch hier wiederum ein durch das in Energie übertragende Medium bestimmter Koeffizient. Aus Gleichung (3) folgt für die dynamische Masse die Gleichung

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{F}{K} r}.$$

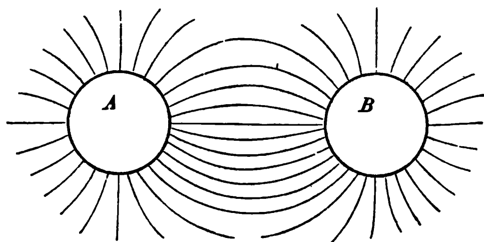


Fig. 1.

Sind zwei kugelförmige dynamische Massen A und B (Fig. 1) in ihren elektrischen oder magnetischen Potentialen

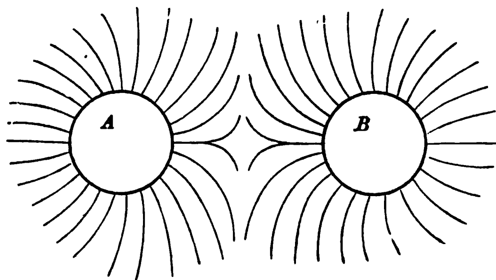


Fig. 2.

verschieden, so erstrecken sich die Kraftlinien von einer Masse zur andern und die beiden Massen werden durch dieselben verbunden, wodurch die Annäherung derselben oder scheinbar die Anziehung herbeigeführt wird. Am dichtesten treten diese gegenseitigen Kraftlinien an den einander zunächst liegenden Punkten der beiden Massen auf. Sind die Massen dehnbar, so werden sie sich an den gegenüberliegenden Seiten gegen einander ausdehnen, wie man dies z. B. an elektrisierten Seifenblasen oder an Gewitterwolken beobachten kann.

Haben dagegen zwei kugelförmige dynamische Massen A und B (Fig. 2) ein und dasselbe Potential, während das Potential des dieselben umgebenden Mediums ein verschiedenes ist, so weichen die Kraftlinien einander aus; infolgedessen werden die Massen, sobald sie frei beweglich sind, sich von einander entfernen oder scheinbar sich gegenseitig abstoßen. Bestehen die Massen aus einer dehnbaren Substanz, so werden sie sich an den gegenüberliegenden Stellen einbauchen.

Hat endlich das die dynamischen Massen umgebende Medium ebenfalls dasselbe Potential wie die Masse selbst, so sind überhaupt keine Kraftlinien vorhanden und die Massen verhalten sich zu einander neutral.

Zweites Kapitel.

Die geometrischen, mechanischen und physikalischen Größen und die Bezeichnung ihrer Einheiten durch das absolute Maßsystem nach Dimensionen.

7. **Die geometrischen Größen.** — Die hier zu betrachtenden geometrischen Größen sind:

Die Fläche, als das Produkt zweier Längen; daher ist ihre Dimension [L^2]. Die Einheit der Fläche im C.G.S.-

System ist das Quadratcentimeter (qcm), das ist die Fläche eines Quadrats von 1 cm Seitenlänge.

Das Volumen, als das Produkt aus drei Längen; daher ist seine Dimension [L^3]. Die Einheit des Volumens nach dem C. G. S.-System ist das Kubikcentimeter (cbcm), das ist ein Kubus oder Würfel von 1 cm Seitenlänge.

Der Winkel; sein natürliches Maß ist das Verhältnis des Bogens zum Radius. Der Winkel ist somit durch das Verhältnis von zwei Längen definiert $(L:L) = (L.L^{-1})$ und hat also zur Dimension L^0, das ist die absolute Einheit; diese Dimension entspricht einer abstrakten Zahl und es wird dieses Winkelmaß als zirkuläres Maß oder Kreismaß bezeichnet. Die Einheit des Kreismaßes ist das Radian, dieser Einheit entspricht ein Winkel, dessen Bogen gleich dem Radius ist. Die Ausmessung der Winkel erfolgt gewöhnlich in Graden nach dem Sexagesimalsystem, zu welchem Zweck der Kreisquadrant in 90 gleiche Teile, also der ganze Kreis in 360 Grade geteilt wird. Die erste Unterabteilung ist die Minute, als sechzigster Teil des Grades, und die zweite Unterabteilung die Sekunde, als sechzigster Teil der Minute. Es ist also in dieser Weise ausgedrückt nach der obigen Definition

$$1 \text{ Radian} = \frac{360^\circ}{2\pi} = \frac{360^\circ}{2 \,.\, 3.142} = 57^\circ\, 17'\, 44''$$

und der Kreisumfang = 360° = 2 π Radians = 6.2832 Radians.

8. **Die mechanischen und physikalischen Größen.** — Es sind dies die Größen, die sich auf die Bewegung und deren Ursachen beziehen. Mit Kraft wird die Ursache der Bewegung und Bewegungsveränderung bezeichnet. Die Masse des bewegten Körpers wird als im Massenmittelpunkt zusammengepreßt gedacht, so daß man also nur die Bewegung eines Punktes anstatt eines Körpers zu betrachten hat, wodurch die Aufgabe möglichst vereinfacht wird. Dieser

bewegte Punkt wird, zum Unterschiede von einem bloßen geometrischen Punkte, als materieller Punkt bezeichnet und derselbe wird als gravitationsfähig wie der Körper betrachtet. Die Bewegung eines materiellen Punktes erfolgt kontinuierlich wie die eines geometrischen Punktes, so daß seine Bahn als eine gerade oder krumme Linie, oder auch als eine Fläche erscheint, die eben oder gekrümmt sein kann. Die Bewegung dieses Punktes ist bestimmt, sobald seine Bahn und seine Stellung in derselben für jeden Zeitmoment bekannt ist. Seine Stellung ist durch den Zeitpunkt des Anfangs der Bewegung und die Entfernung von der Anfangsstellung bestimmt. Diese Entfernung oder dieser Weg ist eine Länge, die nach dem C. G. S. - System in Centimetern gemessen wird. Die Zeit wird, wie üblich, nach Sekunden bestimmt. Durchläuft der materielle Punkt seine Bahn in gleichen Zeiten gleichförmig, so ist seine Bewegung eine gleichförmige.

Die hier zu betrachtenden mechanischen Größen sind folgende:

Die Geschwindigkeit (v). Wenn ein materieller Punkt sich gleichförmig bewegt, so wird seine Geschwindigkeit durch das Verhältnis des durchlaufenen Weges L und der Zeit T bestimmt, in welcher der Weg durchlaufen wird; demnach ist die Geschwindigkeit ein Verhältnis zwischen Länge und Zeit, daher

$$v = \frac{L}{T} = [L T^{-1}].$$

Nach dem C. G. S.-Systeme wird die Geschwindigkeit gemessen durch das Centimeter dividiert durch die Sekunde.

Die Winkelgeschwindigkeit (w). Wird ein Punkt, der sich in der Entfernung r von einer Drehachse befindet und bei seiner Bewegung zu einer Rotation um dieselbe gezwungen ist, in die gleichförmige Geschwindigkeit v versetzt, so beschreibt derselbe in gleichen Zeiten gleiche Kreisbogen, denen gleiche Zentriwinkel entsprechen. Die

Geschwindigkeit v tritt dann als Tangentialgeschwindigkeit auf und sie ist proportional zum Drehungsradius (**radius** vector) r und einem Faktor w, der als Winkelgeschwindigkeit bezeichnet wird; es gilt alsdann die Gleichung

$$v = w\,r, \text{ oder } w = \frac{v}{r}.$$

Die Winkelgeschwindigkeit ist demnach homogen dem reciproken Werte einer Zeit und ihre Dimension ist $[T^{-1}]$.

Im C. G. S.-System hat die Winkelgeschwindigkeit als Einheit das Radian für die Sekunde. Ein Punkt, dessen, Winkelgeschwindigkeit also gleich einem Radian in der Sekunde ist, vollendet eine vollständige Umdrehung in $2\,\pi = 6.2832$ Sekunden.

In der technischen Praxis werden die Winkelgeschwindigkeiten gewöhnlich in Umdrehungen für die Minute, das ist durch die Tourenzahl ausgedrückt. Um diesen Wert in Einheiten des C. G. S.-Systems darzustellen, hat man die Tourenzahl (minutliche Umdrehungszahl) mit dem Faktor $\frac{2\,\pi}{60}$ zu multiplizieren.

Ein materieller Punkt, dessen Geschwindigkeit ungleichförmig ist, legt in den auf einander folgenden Zeiteinheiten verschiedene Weglängen zurück. Seine veränderliche Geschwindigkeit v_1 wird ausgedrückt durch den Differentialquotienten des Verhältnisses aus Weg l und Zeit t, das ist durch

$$v_1 = \frac{d\,l}{d\,t}.$$

Für die gleichförmig veränderliche Bewegung, das heißt, für die Bewegung, bei welcher die Geschwindigkeit sich proportional zur Zeit verändert, gilt Folgendes:

Ist v_0 die Anfangsgeschwindigkeit, v_1 die Geschwindigkeit am Ende der Zeit t und γ die Größe der Veränderlichkeit

der Geschwindigkeit in der Zeiteinheit, so ist am Ende der Zeit t

$$v_1 = v_0 + \gamma t,$$

woraus folgt

$$\gamma = \frac{v_1 - v_0}{t}.$$

Der Faktor γ, das ist das Verhältnis des Wachstums der Geschwindigkeit zum Wachstum der Zeit heißt die Beschleunigung und ihre Dimensionen sind $[L T^{-2}]$.

Nach dem C. G. S.-Systeme ist die Einheit der Beschleunigung das Centimeter durch die Sekunde und nochmal durch die Sekunde, das ist durch die zweite Potenz der Sekunde. Es ist dies die Beschleunigung eines bewegten Punktes, dessen Geschwindigkeit um ein Centimeter in der Sekunde zunimmt.

Die Beschleunigung g der Schwere für einen im luftleeren Raum frei fallenden Körper ist durchschnittlich gleich 981 cm; sie ist aber im allgemeinen für verschiedene Punkte der Erdoberfläche verschieden. Für die geographische Breite λ und für die Höhe h über den Meeresspiegel wird die Beschleunigung in Centimetern bestimmt durch die Formel

$$g = 980 \cdot 6056 - 2 \cdot 5028 \cos 2\lambda - 0.000003\, h.$$

Der Faktor g hat weder als eine Weglänge, noch als eine Geschwindigkeit zu gelten, sondern nur als ein Verhältnis von Raum und Zeit, durch welches ein Kraftimpuls ausgedrückt wird. Für gewöhnlich nimmt man

g = 981 cm durch die zweite Potenz der Sekunde.

Die Kraft (Dyn) und Trägheit. Ein Körper vermag an und für sich weder den Zustand der Ruhe noch den der Bewegung zu verändern. Eine solche Veränderung kann nur durch die Einwirkung einer äußeren Ursache, das ist einer Kraft, hervorgerufen werden.

Eine nach Größe und Richtung konstante Kraft erteilt durch ihre Einwirkung einem materiellen Punkte eine

geradlinige, gleichförmig beschleunigte Bewegung mit, und wenn umgekehrt ein materieller Punkt sich in geradliniger, gleichförmig beschleunigter Bewegung befindet, so schließt man daraus, daß derselbe der Einwirkung einer konstanten Kraft unterliegt. Nach dem Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung ist aber anzunehmen, daß ein Körper oder der ihn ersetzende materielle Punkt in jedem Zeitmomente der Einwirkung der Kraft einen gleichstarken Widerstand entgegensetzt, wobei jedoch der die Beschleunigung erteilende Impuls der Kraft, als Ursache, stets dem als Wirkung nachfolgenden Trägheitswiderstande um einen Zeitmoment voraus ist, indem zur Übertragung jeder Wirkung und zur Entstehung jeder Gegenwirkung Zeit nötig ist.

Eine Kraft F, die auf eine Masse M einwirkt, erzeugt eine Beschleunigung

$$\gamma = \frac{F}{M},$$

woraus folgt

$$F = M\gamma.$$

Demnach entspricht die auf einen Körper wirkende Kraft, und also auch die Gegenwirkung der Trägheit, dem Produkt aus der Körpermasse durch die Beschleunigung. Folglich sind die Dimensionen der Kraft: $[LMT^{-2}]$.

Die Einheit der Kraft nach dem C.G.S.-System ist diejenige Kraft, die, auf die Masse des Grammes einwirkend, demselben eine Beschleunigung von 1 cm in der Sekunde mal der Sekunde, das ist für die zweite Potenz der Sekunde, mitteilt. Man bezeichnet diese Krafteinheit als Dyn.

Die durch die Schwere ausgeübte Kraft wird Gewicht genannt; da die Schwerkraft für die verschiedenen Punkte der Erdoberfläche im allgemeinen verschieden ist, so ist demnach auch das Gewicht einer Körpermasse je nach dessen Bestimmungsorte verschieden. Mit Bezug hierauf ist zu berücksichtigen, daß man mit der gewöhnlichen Hebelwage

nicht die diesem Gewicht entsprechende Kraft, sondern das Verhältnis der Körpermasse nach einer gewählten Maßeinheit bestimmt. Vom Äquator bis zum Pol nimmt das mit der Federwage (dem Dynamometer) zu messende Gewicht eines Körpers ungefähr um 0.005 zu.

Als praktische Einheit des Gewichtes gilt das Gramm oder dessen Vielfaches.

Die Zentrifugalkraft. Diese fälschlich als Kraft bezeichnete Wirkung hat nur als eine Wirkung der Trägheit gegen die, die Erhaltung der Radiuslänge anstrebende Zentripetalkraft zu gelten, welche Wirkung in der Form der Tangentialgeschwindigkeit auftritt; diese Wirkung ist also sekundärer Natur.

Wenn ein materieller Punkt M in der Entfernung r um einen festen Drehpunkt mit der gleichförmigen Geschwindigkeit v rotiert, so wird die Zentripetalkraft und folglich auch ihre gleichwertige Gegenwirkung, die Zentrifugalkraft im absoluten Maßsystem ausgedrückt durch den Wert

$$\frac{Mv^2}{r} \text{ Dyn.}$$

Die Dichte eines Körpers ist das Verhältnis seiner Masse zu seinem Volumen. Die Dimensionen der Dichte sind deshalb $[ML^{-3}]$. Nach dem C. G. S.-System ist die Einheit der Dichte die Gramm-Masse des Kubikcentimeters.

Das spezifische Gewicht. Das spezifische Gewicht eines Körpers ist das Verhältnis seines Gewichtes zu seinem Volumen, so daß sich also das spezifische Gewicht eines Körpers mit der Schwerkraftsbeschleunigung g verändert.

Die Dimensionen des spezifischen Gewichtes sind demnach

$$\frac{MLT^{-2}}{L^3} = [ML^{-2}\,T^{-2}].$$

Man kann jedoch auch das spezifische Gewicht definieren als das Verhältnis des Gewichtes eines gewissen Körpervolumens für einen gegebenen Ort der Erdoberfläche zu dem Gewichte

eines ebensogroßen Wasservolumens. Nach dieser Definition ist das spezifische Gewicht ein einfaches Verhältnis von denselben Dimensionen wie die Dichte, so daß spezifisches Gewicht und Dichte gleichbedeutend werden, was für die Rechnung bequemer ist.

Druck. Wenn eine Kraft F auf eine körperliche Fläche wirkt, so übt sie einen Druck p aus, der durch das Verhältnis der Kraft zur Flächengröße S bestimmt ist, wobei man voraussetzt, daß die Kraftwirkung sich gleichmäßig auf der Fläche verteilt; hiernach hat man also

$$p = \frac{F}{S}.$$

Die Dimensionen des Druckes sind $[ML^{-1} T^{-2}]$.

Nach dem C. G. S.-System ist die Einheit des Druckes das Dyn für das Quadratcentimeter.

In der Praxis wird auch öfters der Atmosphärendruck durch die Höhe der barometrischen Quecksilbersäule von 76 cm Höhe benutzt, welche Höhe dem mittleren Atmosphärendruck, der 1.033 kg für das Quadratcentimeter ist, nahezu entspricht.

Die Arbeit W (Erg). Wenn eine Kraft F in ihrer Richtung auf der Wegstrecke L wirksam ist, so bringt sie die Arbeit W gleich dem Produkt aus Kraft mal durchlaufener Wegstrecke hervor, so daß man also hat

$$A = FL.$$

Die Dimensionen der Arbeit sind deshalb $[ML^2 T^{-2}]$.

Die Einheit der Arbeit nach dem C. G. S.-System ist das Produkt aus einem Dyn, das durch eine Strecke von 1 cm wirksam ist; diese Arbeitseinheit ist also das Centimeter-Dyn oder das Erg. Da diese Arbeitsgröße sehr gering ist, so benutzt man oft das Millionenfache derselben, das ist das Megerg.

In der Praxis benutzt man das Gramm-Meter, das Kilogramm-Meter und die Meter-Tonne, welche Maßgrößen sich, wie folgt, bestimmen:

1 Gramm=Meter = 98100 Ergs.
1 Kilogramm=Meter = 98.1 Megergs.
1 Tonnen=Meter = 98100 Megergs.

Die Arbeitsstärke (P). Eine Maschine, die eine Arbeit A leistet, verrichtet eine um so größere Leistung, je kürzer die Zeit ist, in welcher sie die Arbeit A leistet. Die Leistung einer Maschine bestimmt sich daher durch das Verhältnis der von ihr verrichteten Arbeit zur Zeit, in welcher die Arbeit verrichtet wird. Wird diese Zeit in Sekunden ausgedrückt, so ist die Leistung gleich der Sekundenarbeit; im allgemeinen gilt aber die Gleichung

$$P = \frac{A}{T}.$$

Die Dimensionen der Leistung sind $[ML^2 T^{-3}]$.

Nach dem C. G. S.-System ist die Einheit der Leistung das Sekunden=Erg. Da diese Arbeitsleistung sehr gering ist, so benutzt man häufig das Sekunden=Megerg, das ist das Millionenfache des Erg.

In der Praxis benutzt man als Einheit der Arbeitsleistung das Sekunden=Meterkilogramm = 98.1 Sekunden=Megergs.

Für den Maschinenbetrieb gebraucht man als Arbeitseinheit das empirische Maß „Pferdekraft" oder „Pferdestärke". Diese Pferdestärke ist gleich 75 Meterkilogramm in der Sekunde.

Nach englischem Maß ist die Pferdestärke (Horse power) gleich 550 Fußpfund in der Sekunde oder gleich 33000 Fußpfund in der Minute.

Geht man aber von der Ansicht aus, daß die Arbeitsstärke als Maßeinheit der Arbeit dem Arbeitsbegriff homogen sein und folglich dieselben Dimensionen wie dieser haben müßte, so wird man es gerechtfertigt finden, wenn diese Gleichung die Form erhält

$$P = [ML^2 T^{-2}] \frac{1}{t},$$

wobei man den willkürlichen Zeitfaktor $\frac{1}{t}$ als neue Zeiteinheit anderer Art nicht mit der für den Arbeitsbegriff charakteristischen Zeiteinheit T zu einer Potenz verschmelzt. Auch kann man die Zeiteinheit der Arbeitseinheit als dimensionslose absolute Einheit, das ist als T^0, ansehen, so daß diese Zeiteinheit überhaupt nicht in der Dimensionsformel der Arbeit zum Ausdruck kommen kann.

Die Bewegungsgröße. Eine mit der gleichförmigen Geschwindigkeit v sich bewegende Masse M hat die Bewegungsgröße Mv. Die Dimensionen der Bewegungsgröße sind $[MLT^{-1}]$.

Nach dem C. G. S.-System ist die Einheit der Bewegungsgröße einer Masse die mit der sekundlichen Geschwindigkeit von 1 cm sich bewegende Gramm-Masse.

Der Kraftimpuls oder Stoß ist gleich der einer Masse M momentan mitgeteilten Bewegungsgröße. Kraftimpuls (Stoß) und Bewegungsgröße sind also gleichartige physikalische oder homogene Größen, deren Maß im C. G. S.-System durch das Sekundendyn gegeben ist.

Das Trägheitsmoment (K). Wenn ein materielles System zu einer Drehbewegung (Rotation) um eine Achse veranlaßt wird, so bezeichnet man die Summe der Produkte aus den Massen der einzelnen materiellen Punkte des Systems in die Quadrate der diesen Punkten entsprechenden Drehungsradien als das Trägheitsmoment des Systems. Bezeichnet man die einzelnen Punktmassen mit m, und ihre unter sich allerdings verschiedenen Drehungsradien mit r, so ergiebt die Summe dieser Produkte einen für die Gesamtmasse geltenden mittleren Drehungsradius ϱ und man hat

$$K = \Sigma m r^2 = M \varrho^2.$$

Die Dimensionen des Trägheitsmomentes sind $[ML^2]$.

Nach dem C. G. S.-System ist die Einheit des Trägheitsmoments gleich einer Gramm-Masse, die in 1 cm Entfernung um eine Drehachse schwingt.

Eine um eine Mittelpunktsachse rotierende Kugel vom Halbmesser r hat das Trägheitsmoment $K = \frac{2}{5} M r^2$.

Ein um seine symmetrische Längenachse rotierender Vollcylinder vom Halbmesser r und der Länge l hat das Trägheitsmoment $K = \frac{1}{2} M r^2$.

Die Länge des Cylinders kommt also in diesem Falle gar nicht in Betracht.

Ein um seine symmetrische Längenachse rotierender Hohlcylinder vom äußeren Halbmesser r und inneren Halbmesser r_1, sowie von der Länge l hat das Trägheitsmoment $K = \frac{1}{2} M (r^2 - r_1^2)$. Bezeichmet man den mittleren Halbmesser mit $\frac{r + r_1}{2}$ und die Breite b der durch die Differenz $r - r_1$ bestimmten Ringfläche, so ist $K = M \left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)$. Rotiert dagegen ein Cylinder von der Länge l um eine durch die Mitte seiner Länge gehende, die Längenachse rechtwinklig durchschneidende Querachse, so ist $K = M \left(\frac{r^2}{4} + \frac{l^2}{3}\right)$.

Eine rechtwinklige Platte von der Länge l und Breite b, die um eine zu ihrer Fläche im Durchschnitt der Diagonalen rechtwinklig stehende Achse rotiert, hat das Trägheitsmoment

$$K = \frac{M}{3} \left[\left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2\right].$$

Bezeichnet man mit d die Länge der Rechtecksdiagonale, so ist $K = \frac{M}{3} \left(\frac{d}{2}\right)^2$.

Rotiert dagegen ein gleichseitiges Rechteck von der Höhe h um eine durch seinen Schwerpunkt gehende, mit einer Seite parallel laufende Achse, so ist $K = \frac{M}{3} \left(\frac{h}{2}\right)^2$.

Die lebendige Kraft oder kinetische Energie. Wenn eine Masse M mit einer Geschwindigkeit v sich bewegt, so bezeichnet man das halbe Produkt dieser Masse in das

Quadrat der Geschwindigkeit, das ist: $\frac{1}{2}$ M v^2, als lebendige Kraft oder kinetische Energie.

Die lebendige Kraft ist also der Arbeit [$M L^2 T^{-2}$] homogen und sie wird in denselben Symbolen (Dimensionen) und in denselben Einheiten ausgedrückt.

Bei der Drehbewegung (Rotation), wo K das Trägheitsmoment in Bezug auf die Drehachse und w die Winkelgeschwindigkeit ist, hat man als Ausdruck für die lebendige Kraft $\frac{1}{2}$ w^2 K. Dieser Ausdruck ist ebenfalls der Arbeit homogen.

Die Wärmeeinheit oder Kalorie ist die Wärmemenge, die zur Temperaturerhöhung eines Kilogramms Wasser um 1 °C. aufzuwenden ist. Da die spezifische Wärme des Wassers mit der Temperatur sich ändert, so ist theoretisch erforderlich, daß man als Ausgangspunkt für die Bestimmung der Wärmeeinheit die Temperatur der größten Dichte des Wassers, die zwischen 0° und 4 °C. liegt, annimmt. Für die Praxis hat jedoch die geringe Änderung der spezifischen Wärme des Wassers mit der Temperatur keine Bedeutung.

Für wissenschaftliche Zwecke wird zuweilen als Wärmemaß der tausendste Teil der obigen Kalorie angenommen, indem die Wärmemenge gilt, die zur Erwärmung eines Grammes Wasser um 1 °C. von 0° oder 4° ausgehend nötig ist. Die Einheit wird wohl auch schlechtweg als Kalorie bezeichnet, sollte aber nur unter der Bezeichnung Gramm-Kalorie oder kleine Kalorie benutzt werden, um Irrtum zu vermeiden.

Das mechanische Äquivalent der Wärme bedeutet, daß die Wärme in mechanische Arbeit umgesetzt werden kann, und man versteht darunter das Verhältnis der Kalorie (Kilogramm-Kalorie), zur Arbeitseinheit (Meterkilogramm). Dieses Verhältnis ist

$$\frac{1 \text{ Kalorie}}{1 \text{ Meterkilogramm}} = 425,$$

wie durch viele Versuche, insbesondere von Joule und Hirn auf Grund des von Julius Robert Mayer aufgestellten Gesetzes nachgewiesen worden ist.

Da die Wärme-Einheit oder Kalorie eine empirisch bestimmte Größe ist, so steht dieselbe in keiner direkten Beziehung zum C. G. S.-System.

Das umgekehrte Verhältnis des mechanischen Äquivalents der Wärme, das ist $\frac{1}{425}$, wird als das kalorische Äquivalent der Arbeit bezeichnet.

Zweiter Abschnitt.

Die Erscheinungen und Gesetze der statischen Elektrizitätswirkung.

Drittes Kapitel.

Erzeugung und Verteilung der statischen Elektrizitätswirkung.

9. Die Mittel zum Hervorrufen der stato-elektrischen Erscheinungen. — Der elektrische Zustand kann entweder durch die Ausübung einer unter gewissen Verhältnissen stattfindenden mechanischen Arbeit, z. B. durch Reibung zweier verschiedenartiger Körper, oder auch durch Wärme, Licht, chemische Wirkung und durch andere Effekte hervorgerufen werden. Man unterscheidet deshalb der bequemen Übersicht der bezüglichen Erzeugungsapparate wegen gewöhnlich verschiedene Elektrizitätsarten. Diese Unterscheidungsweise bezieht sich jedoch nur auf die Elektrizitätsquellen, indem die Elektrizität selbst in allen Fällen dieselbe ist. In diesem Sinne unterscheidet man: Reibungselektrizität, Kontaktelektrizität, Magnetelektrizität, Thermoelektrizität ꝛc.

10. Gute und schlechte Elektrizitätsleiter. — Man unterscheidet wohl auch kurzweg elektrische Leiter und Nichtleiter; die letzteren werden auch als dielektrische Körper oder Iso-

latoren bezeichnet; es giebt jedoch keine Substanz, die ein vollkommener Nichtleiter für Elektrizität ist. Als beste Leiter gelten unter den festen Körpern die Metalle, als Nichtleiter oder eigentlich nur als schlechte Leiter sind Seide, Glas, Schwefel, Harze, Kautschuk und Paraffin zu nennen. Man unterscheidet als Zwischenstufe wohl auch noch Halbleiter und rechnet darunter Holzkohle, Koks, Säuren und Salzlösungen, reines Wasser, Porzellan, Papier ꝛc.

Das Leitungsvermögen der festen Körper nimmt in der Regel proportional mit der Temperatur zu, oder — wie man auch sagen kann — der Widerstand (gegen die Leitung der Elektrizität) steigert sich in der Regel proportional zur Temperatur.

Der reziproke Wert des Leitungsvermögens oder der Leitungsfähigkeit ist der spezifische Leitungswiderstand der Körper.

Ihrem elektrischen Leitungsvermögen oder auch ihrem elektrischen Widerstande nach kann man die Metalle folgendermaßen in eine Reihe bringen, wobei man das Leitungsvermögen und den Widerstand des Kupfers als Eins setzt.

		Leitungsvermögen		Widerstand
Kupfer	=	1	=	1
Aluminium	=	7.14	=	0.14
Silber	=	1.48	=	0.67
Gold	=	0.88	=	1.13
Stahl	=	0.77	=	1.13
Messing	=	0.28	=	3.61
Zink	=	0.27	=	3.69
Eisen	=	0.18	=	5.66
Nickelin	=	0.17	=	5.80
Platinsilber	=	0.16	=	6.22
Zinn	=	0.14	=	6.80
Platin	=	0.13	=	7.54
Neusilber	=	0.13	=	7.60
Blei	=	0.11	=	9.70
Quecksilber	=	0.02	=	49.49

In ähnlicher Weise hat man mehrere Flüssigkeiten als Leiter zweiter Ordnung geordnet und bei Kupfer als Einheit den Widerstand, also den reziproken Wert des Leitungsvermögens, wie folgt gefunden:

Schwefelsäure	=	465 000 bis 685 000
„ mit elf Teilen Wasser	=	752 000
Gesättigte Lösung von Kupfervitriol	=	7 000 000 bis 8 000 000
„ „ mit zwei T. Wasser	=	11 600 000
„ „ von Zinkvitriol	=	1 570 000
„ „ von Kochsalz	=	2 115 000
Konzentrierte Salpetersäure	=	1 100 000
Destilliertes Wasser	=	3 000 000 000

Das Leitungsvermögen der Flüssigkeiten nimmt mit der abnehmenden Temperatur ab, indem sich der Widerstand steigert, und zwar erfolgt die Abnahme des Leitungsvermögens bei höherer Temperatur langsam, bei niederer Temperatur schneller; dasselbe gilt natürlich für die Steigerung des Widerstandes.

In der folgenden Tabelle sind eine Anzahl von Halbleitern und sogenannten Isolatoren bezüglich ihres wachsenden Isolationsvermögens zusammengestellt.

Halbleiter	Isolatoren
Holzkohle und Koks	Wolle
Säuren	Seide
Salzlösungen	Glas
Verdünnte Luft*)	Siegellack
Reines Wasser	Schwefel
Stein	Harze
Eis	Guttapercha
Trockenes Holz	Kautschuk
Porzellan	Ebonit
Trocknes Papier	Trockne Luft

*) Je nach dem Grade der Verdünnung.

Viertes Kapitel.

Die statischen Elektrizitätswirkungen.

11. Die elektrostatischen Wirkungen. — Die relativ statischen Wirkungen der Elektrizität äußern sich durch Anziehung oder Abstoßung der elektrisch geladenen Körper, woraus man auf zwei zu einander entgegengesetzte elektrische Zustände schließt, die man als positiv und als negativ elektrischen Zustand von einander unterscheidet, indem man den Satz aufstellt: Gleichartige Elektrizitäten stoßen sich ab, ungleichartige Elektrizitäten ziehen sich an. Trotz dieser Ausdrucksweise nimmt man jedoch gegenwärtig an, daß diese entgegengesetzten Wirkungen nicht durch zwei verschiedene Fluida, sondern durch zwei verschiedene elektrische Zustände hervorgerufen werden.

Nach dem von Coulomb auf Grund des Newtonschen Gravitationsgesetzes durch Versuche mit der Drehwage nachgewiesenen elektrostatischen Gesetze ist die anziehende, beziehungsweise abstoßende Wirkung zwischen zwei elektrisierten Massen direkt proportional dem Produkte der elektrischen Ladungen oder Elektrizitätsmengen dieser Massen und umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung dieser zu Punkten verdichtet gedachten Massen.

12. Die Elektrizitätserregung. — Die Elektrizitätserregung oder Elektrisierung eines Körpers kann auf verschiedene Weise erfolgen. In einfachster Weise werden Massen dadurch elektrisiert oder elektrisch geladen, daß man zwei Körper verschiedener Art gegen einander reibt, wobei es sich zeigt, daß die Elektrisierung des einen der beiden gegeneinandergeriebenen Körper auch die Elektrisierung des anderen Körpers bedingt, jedoch sind die so erzeugten elektrischen Zustände der beiden Körper entgegengesetzter Art, so daß diese Körper durch Anziehung auf einander wirken. Es wird alsdann der eine dieser elektrisierten Körper als positiv elektrisch, der andere als negativ elektrisch bezeichnet. Zur

Durchführung dieser Unterscheidung ist man übereingekommen, einen mit Wolle oder Seide geriebenen und dadurch elektrisierten Glaskörper als positiv elektrisch und eine mit Katzenfell, Wolle oder Seide geriebene Schwefelmasse, oder auch eine Harzmasse als negativ elektrisch zu bezeichnen, so daß man in dieser Beziehung wohl auch die Glaselektrizität und die Harzelektrizität als entgegengesetzte elektrische Zustände von einander unterscheidet. Jedoch ist diese Unterscheidung keine absolute, indem z. B. Glas mit Katzenfell gerieben negativ elektrisch wird, während das Katzenfell in den positiv elektrischen Zustand übergeht. Ebenso wird Schwefel mit Guttapercha gerieben positiv elektrisch, indem Guttapercha noch mehr Neigung zum Eintreten in den negativ elektrischen Zustand hat, als der Schwefel. Nach dem Grade der Neigung, durch gegenseitiges Reiben in den elektrisch positiven oder negativen Zustand überzugehen, kann man eine Anzahl von Substanzen in die folgende Ordnung bringen:

positiv:
Katzenfell
poliertes Glas
Wollstoff
Federn
Holz
Papier
Seide
weißes Wachs
mattes Glas
Schwefel
Metalle
Kautschuk
Guttapercha
negativ:

Die Metalle sind unter sich auch wiederum in der Neigung, durch gegenseitige Reibung positiv oder negativ elektrisch zu werden, unterschieden und zwar lassen sich dieselben in dieser Beziehung in der folgenden Weise aneinanderreihen:

positiv:
Aluminium
Blei, Zink
Kadmium
Eisen, Zinn
Kupfer, Wismut
Antimon
Silber
Platin
Quecksilber, Gold
Palladium
negativ:

13. Der Elektrizitätsverlust durch Ableitung und Zerstreuung. — Ein Verlust an Elektrizität tritt bei elektrisch geladenen Körpern um so stärker auf, in je geringerem Grade dieselben von der Erde isoliert sind, da die Elektrizität stets das Bestreben hat, nach der Erde abzufließen, indem zwischen jedem der künstlich elektrisch geladenen Körper und der Erde eine Potentialdifferenz mit der Neigung des Abströmens der elektrischen Ladung der Körper nach der Erde besteht, gleichviel, ob die Körper nach der oben festgestellten Bedeutung positiv oder negativ elektrisch sind. Man nimmt daher an, daß die Erde gegenüber den elektrisierten Körpern das elektrische Potential Null hat. Außerdem bewirkt aber auch bei den gegen die Erde gut isolierten elektrisierten Körpern die Berührung mit feuchter Luft eine rasche Abnahme in der Stärke des elektrischen Zustandes. Aber auch unter den für die Erhaltung der elektrischen Ladung eines elektrisierten Körpers herstellbaren günstigsten Umständen tritt im Verlaufe der Zeit eine Abnahme des elektrischen Zustandes ein, so daß man annehmen muß, daß auch die besten Isolatoren und selbst der luftverdünnte Raum elektrisch ableitend wirken. In diesem Sinne spricht man von einer Zerstreuung der Elektrizität. Aus diesen Bemerkungen geht zugleich hervor, wie man einen elektrisierten Körper gegen Elektrizitätsverlust am besten zu schützen hat.

14. Das Elektroskop. — Um zu erkennen, ob ein Körper elektrisch oder unelektrisch ist, bedient man sich des Elektroskops, das in seiner einfachsten Einrichtung, als elektrisches Pendel, aus einem an einem mit Schellackfirnis überzogenen Seidenfaden aufgehängten Holundermarkkügelchen besteht (Fig. 3). Da dieses elektrische Pendel aber nur stärkere elektrische Ladungen anzuzeigen vermag, so bedient man sich zum Nachweis schwacher elektrischer Ladungen des in Fig. 4 dargestellten Elektroskops. Dasselbe enthält in einem Glasgefäß zwei an feinen Drähten und mit der oberhalb befindlichen Kugel daher in elektrischer Verbindung stehende Holundermarkkügelchen oder Strohhalme, oder auch — um das

Instrument noch empfindlicher zu machen — zwei lange Streifchen Blattgold. Sobald die Kugel des Elektroskops mit einem elektrisierten Körper berührt wird, geht ein Teil der elektrischen Ladung auf die beiden Pendel, bezw. Blattgoldstreifen oder Strohhalme über, und da beide gleichartig elektrisch geladen sind, so stoßen die beiden Pendel einander ab und zwar um so stärker, je stärker der Versuchskörper geladen war, so daß auch eine gewisse Abschätzung der Ladungsstärke mit diesem Instrumente möglich ist. In dem Kapitel über elektrische Messungsinstrumente werden noch feinere Instrumente zur Messung elektrischer Ladungen beschrieben werden.

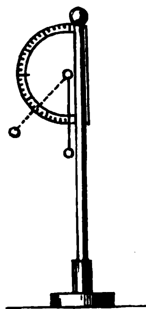


Fig. 3.



Fig. 4.

15. Die Verteilung der statischen Elektrizität. — Die statische Elektrizität, die stets nur in geringer Menge aber mit hoher Spannung vorkommt, tritt in ihrer Wirkung nur an der Oberfläche der Körper hervor und ihre Verteilung in Bezug auf die Stärke und Verschiedenheit der Dichte ist von den Abmessungen und der Form der Körper abhängig. Auf guten Leitern verbreitet sich die elektrische Ladung momentan und auf einer Kugeloberfläche erfolgt die Verteilung der elektrischen Ladung in gleichmäßiger Dichte. Auf schlechten Leitern tritt die elektrische Ladung in der Hauptsache nur an der

Zuführungs- oder Reibungsstelle auf. Bei cylindrischen Leitern verdichtet sich die elektrische Ladung nach den Enden hin, und beim Vorkommen von Kanten, Ecken und Spitzen ist die Dichte der elektrischen Ladung an diesen Stellen am stärksten. Da die Verteilung der elektrischen Ladung stets nur an der Oberfläche sich vollzieht, so ist es gleichgültig, ob die leitenden Körper hohl oder voll sind und ein nicht leitender, mit einer dünnen Metallschicht überzogener Körper verhält sich wie ein Leiter. Überhaupt ist die materielle Beschaffenheit der Körper hinsichtlich der Elektrizitäts-

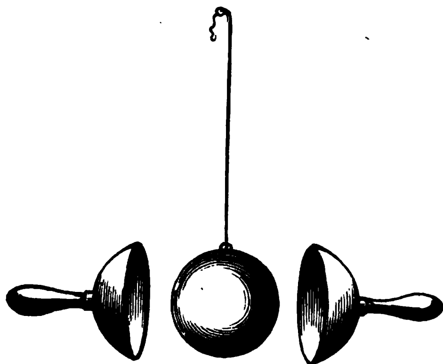


Fig. 5.

verteilung gleichgültig. Auf zwei Kugeln von gleichem Durchmesser, von denen z. B. die eine aus Kupfer, die andere aus Holz besteht, verteilt sich die Elektrizität in gleicher Weise.

Zum Nachweis der statischen Elektrizität benutzt man die folgenden Methoden.

Eine an einem Seidenfaden aufgehängte oder auf einer Glassäule ruhende und somit von der Erde isolierte Metallkugel (Fig. 5), voll oder hohl, wird mit einer elektrischen Ladung versehen, was dadurch geschieht, daß man diese

Kugel mit der Kugel einer geladenen sogenannten Leydener Flasche in Berührung bringt. Wird hierauf die so etwa positiv geladene isolierte Kugel mit zwei metallnen hohlen Halbkugeln bedeckt, die zum isolierten Anfassen mit Glas- oder Hartgummigriffen versehen sind, so wird man nach dem sofort wieder stattgefundenen Abnehmen dieser Halbkugeln mittels eines Elektroskops nachweisen können, daß die zuerst geladene Kugel ihre Ladung vollständig verloren hat, während die beiden Halbkugeln sich entsprechend elektrisch zeigen. Es ist dies der sogen. Biotsche Versuch.

Zum weiteren Nachweis der Oberflächenladung kann man eine hohle, auf einer Glassäule ruhende Metallkugel benutzen (Fig. 6). Diese Kugel ist oben mit einer kreisförmigen Öffnung versehen, durch welche ein an einer fadendünnen Schellackstange befestigtes Rauschgoldscheibchen (Probescheibchen) bequem, ohne in Berührung mit dem Rande der Öffnung zu kommen, in das Innere der vorher elektrisch geladenen Kugel eingeführt werden kann. Berührt man mit dem Probescheibchen die äußere Oberfläche der elektrisierten Hohlkugel, so läßt sich mittels eines Elektroskops nachweisen, daß das Probescheibchen elektrisch geworden ist, woraus folgt, daß die Kugeloberfläche eine elektrische Ladung besitzt. Bringt man dagegen das durch Berührung mit der Hand wieder entelektrisierte Probescheibchen ohne Berührung mit der Kugel durch die Öffnung in das Innere der geladenen Kugel hinein, und berührt dann die Innenfläche der Kugel, worauf man das Scheibchen behutsam ohne

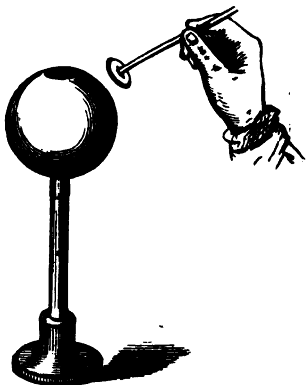


Fig. 6.

Berührung des Öffnungsrandes wieder herauszieht, so daß kein Teil der äußeren Kugelfläche mit dem Scheibchen in Berührung kommt, so läßt sich an dem Scheibchen auch mit dem empfindlichsten Elektroskop keine Spur von Elektrizität nachweisen, falls der Versuch mit aller Sorgfalt ausgeführt worden ist. Hierdurch ist der Beweis geliefert, daß die elektrische Ladung sich nur auf der äußeren Oberfläche der elektrisierten Kugel befindet und dies ist der Fall auch wenn diese Kugel möglichst dünnwandig ist.

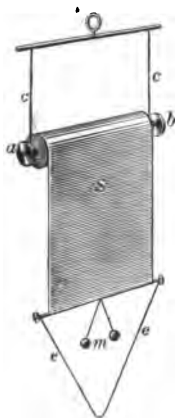


Fig. 7.

Ein dritter, die bloß oberflächliche Elektrizitätsverteilung nachweisender Versuch läßt sich in der durch Fig. 7 dargestellten Weise ausführen. Wird nämlich die Oberfläche eines Leiters vergrößert, so folgt die elektrische Ladung dieser Vergrößerung durch Ausdehnung und ihre Dichtigkeit nimmt dadurch verhältnismäßig ab. Um dies nachzuweisen wird ein langer und etwas breiter Stanniolstreifen S um einen an Seidenfäden c c bei d aufgehängten runden Glasstab **a** b aufgewickelt. Unterhalb ist der Stanniolstreifen an einen dünnen Metallstab befestigt, der wiederum mit einem Seidenfaden e e verbunden ist. Um das rasche Entweichen der Elektrizität möglichst zu verhüten ist dieser Metallstab mit abgerundeten Enden versehen. Anstatt des Metallstabes kann man noch besser einen Glasstab benutzen. Endlich sind unterhalb mit dem Stanniolstreifen noch zwei an dünnen Metallfäden aufgehängte Holundermarkkügelchen **m** angebracht, welche um so mehr auseinandergehen, je mehr sich die elektrische Ladung auf dem Stanniolstreifen verdichtet, oder — wie man auch sagen kann, — das Potential der Ladung verstärkt. Hat man den Stanniolstreifen zuerst gänzlich auf die Walze **a** b aufgewickelt und mit einer ver=

hältnismäßig starken elektrischen Ladung versehen, so werden die Holundermarkkügelchen der beiden elektrischen Pendel sich entsprechend kräftig abstoßen und weit auseinandergehen. Rollt man alsdann durch Anfassen an der Fadenschlinge e den geladenen Stanniolstreifen von der Walze a b ab, so daß sich seine freie Oberfläche allmählich vergrößert, so verbreitet sich die vorher nur auf dem äußeren Umfange des zusammengerollten Stanniolstreifens verteilte und daher entsprechend weniger verdichtete elektrische Ladung mehr und mehr auf der sich vergrößernden Stanniolfläche. Indem die Dichte der Ladung abnimmt, nimmt auch die Abstoßung der beiden Pendelkügelchen ab und dieselben gehen mit dem fortschreitenden Abrollen des Stanniolstreifens mehr und mehr zusammen.

Von besonderem Interesse ist noch ein anderer Versuch, wobei die elektrische Ladung einem aus siebartigem Drahtgewebe gebildeten isolierten Hohlcylinder mitgeteilt worden ist. Auch in diesem Falle läßt sich mit dem oben erwähnten Probescheibchen nachweisen, daß die elektrische Ladung nur am äußeren Umfange des siebartigen Metallcylinders vorhanden und dessen innere Oberfläche elektrizitätsfrei ist.

Fünftes Kapitel.

Die Erscheinungen der elektrischen Influenz oder statischen Induktion.

16. Auftreten und Nachweis der statischen Induktion. — Die elektrische Influenz oder statische Induktion tritt hervor, wenn man einen elektrisierten oder elektrisch geladenen Körper in die Nähe eines anderen isolierten Körpers, insbesondere eines Leiters bringt, so daß dieser letztere Körper nur der Wirkung des elektrischen Feldes oder der elektrischen Atmosphäre des elektrischen Körpers ausgesetzt ist, ohne in unmittelbare Berührung mit dem elektrischen Körper zu kommen.

Zum Nachweis der betreffenden Erscheinung bringt man beispielsweise in die Nähe einer positiv geladenen isolierten Kugel A einen isolierten Metallcylinder, das ist einen sogen. Konduktor B, an welchem eine Anzahl paarweis angeordneter elektrischer Pendel in gleichen Abständen von einander

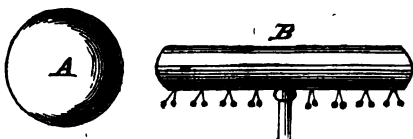


Fig. 8.

befestigt ist. Mit abnehmender Entfernung zwischen der elektrisch geladenen Kugel und dem ungeladenen Konduktor gehen die Pendelkugeln mehr und mehr aus einander und zwar um so mehr, je näher dieselben sich an den Konduktorenden befinden und die der elektrischen Kugel zunächst befindlichen suchen dieser merklich näher zu kommen. Nach der Mitte des Konduktors zu gehen die Pendel weniger aus einander und bei einem gerade in der Mitte des Konduktors befindlichen Pendel wird sich überhaupt kein Auseinandergehen und folglich auch keine elektrische Wirkung zeigen, woraus ersichtlich ist, daß der Konduktor in der Mitte sich in einem elektrisch neutralen Zustande befindet. Untersucht man die beiden Konduktorenden mit einem positiv geladenen Pendel, nach der Art, wie Fig. 8 es zeigt, so wird dieses Pendel von dem der geladenen Kugel A zunächst befindlichen Konduktorende angezogen und von dem entgegengesetzten Konduktorende abgestoßen werden, wodurch bewiesen wird, daß das der Kugel A zunächstbefindliche Konduktorende negativ, das entgegengesetzte Ende positiv geladen ist.

Die auf den beiden Konduktorhälften durch die Influenzwirkung erzeugten Elektrizitätsmengen sind gleich groß; dies ergiebt sich daraus, daß bei Entfernung des influenzierenden Körpers der influenzierte Körper seine Elektrizität

sofort wiederum vollständig verliert und somit auch bei Entfernung der Kugel A vom Konduktor B dessen Pendel alsbald wieder zusammenfallen. Dies wird auch geschehen, wenn man durch Berührung des einen Konduktorendes mit der Hand die positive oder negative Hälfte der auseinandergetriebenen Elektrizität ableitet. Es ist indessen zu bemerken, daß infolge ungleichmäßiger Zerstreuung der geschiedenen Elektrizitätsmengen zuweilen die eben erwähnte vollständige Aufhebung der Influenzierung nicht gelingt, indem nach der Neutralisierung der durch die Influenzierung geschiedenen und bei Aufhebung der Influenzierung wieder zusammengehenden entgegengesetzten Elektrizitätswirkungen ein Teil der einen oder anderen Erregungsart als Rest zurückbleibt.

Eine successive und nacheinander eintretende Influenzierung findet statt, wenn ein influenzierter Leiter auf einem andern Leiter Influenz erzeugt. Es geschieht dies, wenn man einem influenzierten Leiter einen zweiten Leiter nähert. Der Nachweis der successiven Influenz läßt sich in der Weise erbringen, daß man zwei isolierte horizontal cylindrische Konduktoren in geringem gegenseitigen Abstande in gleicher Richtung aufstellt, und zwischen dieselben eine an einem Seidenfaden aufgehängte Korkkugel bringt. Nähert man nun dem äußeren Ende des einen Konduktors einen elektrisierten Körper, so schwingt die Korkkugel lebhaft vom inneren Ende dieses Konduktors nach dem inneren Ende des andern und kommt dann, nach einigen Schwingungen, wieder zur Ruhe, wenn der influenzierende Körper in seiner Lage verharrt. Wird aber der influenzierende Körper wieder entfernt und damit die Influenzierung auch wieder aufgehoben, so schwingt die Kugel abermals mit einigen Schwingungen hin und her, um dann auch wieder in den lotrechten Ruhestand einzutreten.

Bezüglich der Influenzierung oder Verteilung der Elektrizität hat Faraday den folgenden Grundsatz aufgestellt: Wenn ein elektrisierter Körper vollständig von einem beliebig gestalteten hohlen Leiter umgeben ist, so wird durch Influenz auf

der inneren Fläche dieses hohlen Leiters eine Schicht elektrischer Erregung von entgegengesetzter elektrischer Natur im Vergleich zur elektrischen Natur des influenzierenden Körpers erregt, während auf der äußeren Oberfläche des Leiters eine Schicht elektrischer Erregung auftritt, deren Natur mit derjenigen der innern influenzierten Schicht entgegengesetzt ist und folglich mit der elektrischen Natur des influenzierenden Körpers übereinstimmt. Quantitativ sind die auf dem Leiter influenzierten Elektrizitätsmengen mit der influenzierenden Elektrizitätsmenge gleich, die Art ihrer Verteilung hinsichtlich der Dichte ist von der Form des Leiters abhängig.

Fig. 9 zeigt die Ausführung des Faradayschen Versuchs. In ein auf isolierender Unterlage stehendes cylindrisches dünnwandiges Metallgefäß A wird eine elektrisch positiv geladene, an einem Seidenfaden befestigte Metallkugel B in der Mitte des Gefäßes eingehängt. Die Innenwand des Gefäßes wird infolgedessen durch Influenzierung negativ-elektrisch, die Außenwand des Gefäßes positiv-elektrisch erregt, wie sich mittels eines Elektroskops nachweisen läßt, indem man mittels eines passend gebogenen Drahtes einmal die Innenwand und ein andermal die Außenwand des Blechgefäßes A mit einem Elektroskop (Fig. 4 S. 51) in Verbindung setzt. Hat man beispielsweise vor dem Einhängen der elektrisierten Kugel B das Gefäß A außerhalb mit dem Elektroskop verbunden, so zeigen die Goldplättchen (bezw. Strohhalme) des Elektroskops sofort einen Ausschlag, wenn man die Kugel über die Mündung des Gefäßes bringt.

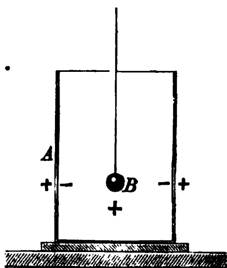


Fig. 9.

Dieser Ausschlag wird immer größer, bis die elektrisierte Kugel ungefähr bis zur Mitte des Gefäßes hinabgelassen worden ist. Von da an bleibt der Ausschlag des Elektroskops unverändert, gleichviel ob man die Kugel im Gefäß hin und her bewegt, oder die innere Gefäßwand damit berührt. Bei dieser Berührung bildet der influenzierende und influenzierte (oder — wie man auch sagen kann — der induzierende und induzierte) Körper eine einzige elektrisierte Masse und von der Innenfläche des Gefäßes ist jede Spur von Elektrizität verschwunden, woraus folgt, daß durch die Influenzierung oder Induzierung nur die Oberfläche elektrisch erregt wird und die dabei erzeugte Elektrizitätsmenge genau der auf dem influenzierenden Körper ursprünglich vorhandenen Elektrizitätsmenge entspricht. Weiter folgt auch daraus, daß die auf der Außenseite des Gefäßes befindliche Ladung entgegengesetzter Art zu der inneren Ladung ist.

Ist das cylindrische Gefäß im Verhältnis zu seinem Durchmesser bedeutend hoch, so kann man die tief in dieses Gefäß hinabgelassene Kugel als in einem ringsum geschlossenen Leiter befindlich ansehen, so daß der oben angeführte Grundsatz auch für einen ringsum geschlossenen Leiter Giltigkeit hat.

Faraday hat diesen Versuch auch noch mit mehreren und zwar bis vier konzentrisch isoliert ineinandergestellten cylindrischen Blechgefäßen ausgeführt und nachgewiesen, daß nach Einhängen der elektrisierten Kugel in das innere Gefäß bei Verbindung des äußeren Gefäßes mit dem Elektroskop dasselbe genau den gleichen Ausschlag zeigt, als wenn das erste, zweite oder dritte Gefäß mit dem Elektroskop verbunden wird, woraus hervorgeht, daß jeder der für sich isolierten Leiter ganz in derselben Weise wie im vorigen Falle mit Bezug auf Fig. 9 der Influenzierung oder Induktion unterliegt.

Bemerkenswert ist auch noch die Influenzierung auf bereits elektrisch geladene Leiter.

Ist ein Leiter (Konduktor) bereits mit einer elektrischen Ladung versehen und nähert man demselben einen anderen

elektrisierten Körper, so macht sich die Influenzwirkung oder Induktion gleichfalls geltend. Der elektrische Zustand des influenzierten Körpers entspricht alsdann der Übereinanderlagerung zweier verschiedenartiger elektrischer Schichten, indem die Schicht der ursprünglichen Ladung des influenzierten Leiters unverändert bleibt und eine Schicht influenzierter, der Einwirkung des influenzierenden Körpers entsprechender Elektrizitätserregung sich darüber lagert.

17. **Influenz bei schlecht leitenden Körpern oder Isolatoren.** — Schlecht leitende Körper werden aus einer bestimmten Entfernung von einem genügend stark elektrisierten Leiter in derselben Weise influiert oder induziert wie leitende Körper, aber in einem dem Mangel der Leitungsfähigkeit entsprechend geringeren Maße; außerdem tritt aber bei schlecht leitenden (dielektrischen) Körpern infolge ihrer großen Kapazität die Elektrizität nicht bloß an der Oberfläche auf, sondern sie dringt auch in das Innere dieser Körper ein und kommt somit bei der Entladung solcher Körper allmählich zum Vorschein. Werden z. B. zwei dicke aufeinandergelegte Schwefelplatten oder Hartgummiplatten beiderseits mit einer Metallplatte bedeckt und einige Minuten hindurch der Wirkung einer Elektrisiermaschine ausgesetzt, wobei die eine Metallplatte mit der Elektrisiermaschine, die andere Metallplatte mit dem Erdboden verbunden ist, so zeigt sich Folgendes: Werden die beiden dielektrischen Platten nach der Ladung entladen und auf eine Glasplatte gelegt, um sie isoliert zu erhalten, so zeigen sich dieselben nach Verlauf einiger Zeit entsprechend der Ladungsweise wiederum entgegengesetzt elektrisch. Leitet man diese Elektrizität abermals durch Berührung mit der Hand ab, so kann man nach Verlauf einiger Zeit wiederum Spuren der entgegengesetzten Elektrizitäten an den Platten nachweisen und so fort, bis die dielektrischen Platten sich allmählich vollständig entladen haben. Diese Erscheinung ist besonders bei den Kondensatoren zu berücksichtigen.

Unter gewissen Umständen kann bei einem dielektrischen Körper auch die sogenannte Doppelinfluenz eintreten, indem

die beiden entgegengesetzten Seiten desselben anstatt der regelrechten entgegengesetzt elektrischen Erregung gleichartige elektrische Erregung zeigen.

18. **Die Natur der Nichtleiter oder Dielektrika.** — Ein Dielektrikum ist ein Körper, der beim Halten in der bloßen Hand, also ohne besondere Isolation von der Erde durch Reiben elektrisch gemacht werden kann. Gilbert, der sich zuerst mit der Erforschung der Erregung der Elektrizität durch Reiben verschiedener Körper beschäftigte, bezeichnete derartige Körper als elektrische oder idioelektrische; dagegen die Körper, die erst eine Isolation von der Erde mittels idioelektrischer Körper bedürfen, als anelektrische. Zu den Körpern der letzteren Art gehören insbesondere die Metalle und die Flüssigkeiten, jedoch besteht ein Unterschied zwischen beiden; denn während die Metalle die Elektrizität als elektrische Strömung durch sich hindurch oder auch vielleicht nur auf ihrer Oberfläche fortleiten, übertragen die Flüssigkeiten die Elektrizität durch die Strömung der elektrisch geladenen Masseteilchen oder — wie man sagt — durch Konvektion. Aus diesem Grunde gehört auch der menschliche und überhaupt animalische Körper, der mit Flüssigkeit durchtränkt ist, zu den anelektrischen oder leitungsfähigen Körpern. Die idioelektrischen, oder — wie man sie jetzt nennt — dielektrischen Körper oder Dielektrika sind also Nichtleiter für die Elektrizität. Immerhin nehmen aber die Dielektrika ebenfalls Elektrizität auf und sie können also elektrisch geladen werden. Doch findet durch sie hindurch keine Ausgleichung einer Potentialdifferenz statt. Faraday hat deshalb angenommen, daß die Dielektrika aus einer wirklich absolut isolierenden Substanz bestehen, in der aber elektrisch leitende, von einander vollständig isolierte Teilchen eingeschlossen sind, so daß also ein Dielektrikum als ein dichtes Gemisch aus nichtleitender Substanz und leitender Substanz zu denken ist. Elektrische Ladungen können durch ein Dielektrikum nicht hindurch, weil die leitende Verbindung zwischen den in der isolierenden

Substanz eingebetteten Teilchen fehlt, aber infolge der in diesen leitenden Teilchen durch äußere elektrische Einwirkung stattfindenden Influenzierung oder Induktion wird auch ein Dielektrikum elektrisch und kann infolgedessen von elektrischen Körpern angezogen werden. Wirkt also auf ein Dielektrikum ein elektrischer Körper ein, so wird im Dielektrikum eine elektrische Kraft $F = \frac{1}{K}$ geweckt, wobei $K = 1 + 4\pi\varepsilon$ ist, worin 4π die schon auf S. 30 erwähnte Ausbreitung der elektrischen Wirkung auf einer kugelförmigen Potentialfläche vom Radius Eins und ε eine von der Natur des Mediums abhängige Konstante bezeichnen. Da aber der absolute Wert von K unbekannt ist, so kann man zwischen verschiedenen Dielektrika D_1 und D_2 nur das Verhältnis $K_1 : K_2$ bestimmen und hat also dafür die Gleichung:

$$F_2 = F_1 \frac{K_1}{K_2}.$$

Für die wichtigsten Dielektrika sind, sowohl für feste wie auch für flüssige Körper, die folgenden zuverlässigsten Zahlenwerte der sogenannten Dielektrizitätskonstante K zusammengestellt*).

Feste Körper.

Dielektrikum	K
Paraffin	1.99—3.32
Kautschuk, schwarz	2.22
Ebonit	2.28—3.15
Guttapercha	2.46
Kautschuk, vulkanisiert	2.50
Kolophonium	2.55
Schellack	2.74
Flintglas, leicht	3.01
Crownglas	3.11
Flintglas, schwer	3.16
Schwefel	3.84—4.77

*) Franz Exner, „Vorlesungen über Elektrizität“. Leipzig und Wien 1888.

Flüssigkeiten.

Dielektrikum	K
Schwefelkohlenstoff	1.81
Petroleumäther	1.92
Petroleum	2.05—2.10
Terpentinöl	2.10—2.18
Terpentin	2.23
Spermacetiöl	3.02
Klauenöl	3.07
Olivenöl	3.16
Ricinusöl	4.78

Wird ein Dielektrikum durch Elektrizität von außen erregt, so findet in seiner ganzen Masse eine Verschiebung von Elektrizität statt und es tritt eine Spannung ein.

Sechstes Kapitel.

Erzeugung der statischen Elektrizitätswirkung.

19. **Statoelektrische Apparate und Maschinen.** — Man versteht darunter Vorrichtungen, welche gestatten elektrische Energie in der Form elektrischer Entladungen zu erzeugen. Eine derartige Vorrichtung besteht im wesentlichen aus drei Teilen: einem Hervorbringer oder Erzeuger, einem Aufnehmer oder Übertrager und einem Sammler oder Kondensator.

Man unterscheidet zwei Klassen derartiger Elektrizitätsquellen, nämlich Reibungsvorrichtungen oder Reibungsmaschinen und Influenz- oder Induktionsvorrichtungen oder Maschinen; als ein Mittelding zwischen diesen beiden Arten von Elektrizitätserzeugern ist der Elektrophor zu nennen, dessen Wirkungsweise als einfachster elektrischer Apparat bezüglich der Erkenntnis der Natur der statischen Elektrizitätswirkung von Interesse ist.

20. **Der Elektrophor.** — Dieser Apparat besteht im allgemeinen aus einer kreisrunden isolierten Platte oder Kuchen aus dielektrischem Material, wozu man ein geeignetes Gemisch aus Harz, Pech und dergleichen oder Hartgummi wählt. Durch Reiben mit Katzenfell, Fuchsschwanz oder trocknem Wollenzeug wird dieser Kuchen elektrisch erregt und alsdann die Ladung mittels einer metallnen Scheibe abgenommen.

Die Wirkungsweise des Elektrophors beruht auf den folgenden Erscheinungen. Der geriebene Harzkuchen ist negativ-elektrisch. Die auf den elektrischen Kuchen aufgesetzte Metallscheibe wird durch Influenz an der unteren, die negative Harzfläche berührenden Seite positiv, an der oberen Seite negativ elektrisch. Wird die obere Seite der so influierten Metallscheibe mit der Hand berührt oder sonstwie in leitende Verbindung mit der Erde gebracht, so wird die negative Elektrizitätserregung abgeleitet und es bleibt nur noch die positive elektrische Ladung in der Scheibe (dem Elektrophordeckel) zurück, welche demselben in der Form von Funken entzogen werden kann. Einen ohne Unterbrechung wirkenden Elektrophor von viel stärkerer Wirkung erhält man durch die alten elektrostatischen Reibungsmaschinen oder mehr noch durch die neuere Influenzmaschine.

21. **Die Influenzmaschine.** — Sogenannte Elektrophor- oder Influenzmaschinen wurden zuerst von den deutschen Physikern Toepler und Holtz (1845) hergestellt. Die Töplersche Vorrichtung besteht in ihrer einfachsten Ausführung aus einer kreisrunden horizontalen rotierenden Glasscheibe, die auf der unteren Seite mit zwei bis an den Rand reichenden Stanniolsegmenten **aa** belegt ist, so daß in der Mitte ein querdurchgehender Streifen des Glases frei bleibt. Auf der anderen Seite ist der Umfang der Scheibe, entsprechend den von den Stanniolsegmenten eingenommenen Bogen, mit zwei schmalen halbkreisförmigen Stanniolstreifen versehen, die mit den Segmenten leitend verbunden sind.

Unterhalb der drehbaren Glasscheibe befindet sich eine leitende isolierte halbkreisförmige Platte, deren Größe den Stanniolsegmenten entspricht, in geringem Abstande von letzteren. Diese Platte bildet den Induktor oder Influenzator und sie steht zu dem Zweck mit einer Elektrizitätsquelle von konstantem Potential, z. B. mit einer trockenen Säule, in Verbindung. Wird unter Erfüllung dieser Bedingung die Glasscheibe in Rotation versetzt, so wird das darüber hinweggehende Stanniolsegment durch Influenz elektrisch. Zur Aufnahme der influenzierten Ladungen der Segmente sind zwei isolierte Konduktoren vorhanden, deren diametral über der Glasscheibe stehende Enden mit leicht biegsamen elastischen Metallstreifchen versehen sind, welche über die Stanniolringe hinwegstreichen und die entgegengesetzten Ladungen aufnehmen, so daß sich allmählich in dem einen Konduktor positive, in dem anderen Konduktor negative Elektrizität bis zu gewisser Stärke anhäuft.

Das Prinzip der Holtzschen Influenzmaschine ist in Fig. 10 dargestellt. Dieselbe besteht aus zwei parallelen,

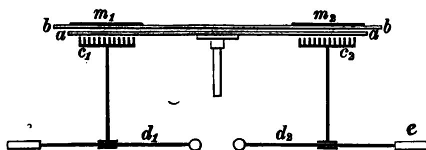


Fig. 10.

in geringer Entfernung von einander angebrachten Glasscheiben, von denen die eine aa am Ende einer drehbaren horizontalen Welle sitzt, während die zweite Glasscheibe bb fest ist. An dieser zweiten Glasscheibe sind an den Stellen m_1 m_2 kurze Stanniolstreifen aufgeklebt, welche bogenförmig gekrümmt sind und einander diametral gegenüberliegen. Einer dieser Streifen wird elektrisiert, was gewöhnlich mittels einer geriebenen Platte aus Hartgummi geschieht,

und hierauf wird die bewegliche Scheibe a a in rasche Umdrehung versetzt. Durch diese Rotation wird an den Kugeln der mit den Saugspitzen c_1 c_2 versehenen Konduktoren d_1 d_2 eine Potentialdifferenz hervorgerufen. Mittels der hölzernen Handgriffe e e kann man die beiden Konduktorkugeln in eine gewisse Entfernung von einander stellen und so die Potentialdifferenz auf einen Maximalwert bringen, der nicht überschritten werden kann. Diese Potentialdifferenz ist bedeutend größer als diejenige, welche man anfangs durch das Elektrisieren des Stanniolstreifens erzeugte.

Die Wirkungsweise dieser Maschine beruht auf dem von Rieß aufgestellten Prinzip der Doppelinfluenz und zwar in der folgenden Weise:

Der zu Anfang mittels der geriebenen Hartgummiplatte elektrisierte Stanniolstreifen m_1 wird bewirken, daß die Glasscheibe a an der Stelle, die sich zwischen dem elektrisierten Stanniolstreifen und den Saugspitzen c_1 des Konduktors d_1 befindet, positiv elektrisch wird und zwar erfolgt diese positiv elektrische Erregung der Glasscheibe beiderseits, nämlich nach der Seite von m_1 hin durch die unmittelbare Influenz und auf der andern Seite dadurch, daß gleichzeitig der Leiter c_1 d_1 influenziert wird und seine positive Influenzelektrizität aus den Saugspitzen c_1 auf die Glasscheibe übergehen läßt, wodurch nicht nur die daselbst zuerst erregte negative Influenzelektrizität neutralisiert wird, sondern auch noch ein Überfluß positiver Influenzelektrizität sich ansammelt, wobei selbstverständlich die negative Influenzelektrizität des Konduktors d_1 nach der Erde abgeleitet werden muß. Dieser etwas komplizierte Vorgang wird als Doppelinfluenz bezeichnet und derselbe erneuert sich fortwährend, wenn die Glasscheibe a in Rotation sich befindet. Denkt man sich nun den Stanniolstreifen m_2 infolge des positiv elektrischen Zustandes der Glasscheibe ebenfalls als positiv elektrisch, so ist leicht einzusehen, daß während der Rotation der Scheibe a ein Strom positiver Elektrizität durch den Konduktor c_2 d_2 nach der Erde abgehen wird, sobald sich dieser Konduktor

ebenfalls in leitender Verbindung mit der Erde befindet. Sind nun aber die beiden Konduktoren $d_1 d_2$ nicht zur Erde abgeleitet, sondern mit ihren Kugeln in eine solche Entfernung von einander gestellt, daß ihre Potentialdifferenz diesen Abstand zu überwinden vermag, so wird während der Rotation der Glasscheibe a zwischen diesen beiden Konduktorkugeln eine fortdauernde Funkenentladung stattfinden, welche von den Influenzelektrizitäten der beiden Konduktoren hervorgerufen wird.

Eine der neuesten und wirksamsten Influenzmaschinen ist die von James Wimshurst in London. Diese in

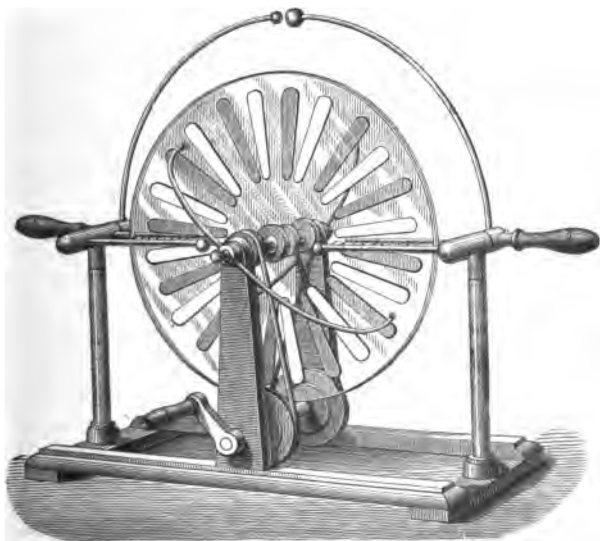


Fig. 11.

Fig. 11 dargestellte Maschine ist mit zwei aus gewöhnlichem Fensterglas bestehenden Scheiben von etwa 38 cm Durchmesser versehen, welche derart auf einer festen hori=

zontalen Spindel sitzen, daß sie mit etwa 3 mm Zwischenraum nach entgegengesetzten Richtungen in rasche Umdrehung versetzt werden können, was von einer unten befindlichen Welle mittels einer offenen und einer gekreuzten Schnur durch Umdrehung einer Kurbel geschieht; hierbei haben beide Scheiben dieselbe Umdrehungsgeschwindigkeit. Beide Scheiben sind gut gefirnist und auf der äußern Seite von jeder sind zwölf radiale sektorenförmige Platten aus dünnem Messingblech in gleichen Entfernungen von einander aufgekittet; die Platten der einen Scheibe bilden die Induktoren für die der andern Scheibe. Je zwei in einem Durchmesser gelegene Sektoren jeder Scheibe kommen bei jeder Umdrehung zweimal mit einem Paar feiner Drahtbürsten in Berührung, welche an den Enden einer gekrümmten Stange sitzen, die in der Mitte ihrer Länge durch eines der vorstehenden Enden der festen Scheibenachse getragen wird.

Die Stellung dieser beiden Bürsten ist in Bezug auf die beiden festen Kollektorkämme veränderlich, indem jedes Paar bis zu einer gewissen Winkeldistanz um die Achse gedreht werden kann, und es giebt für diese Bürsten eine Stellung der Maximalwirkung, welche ungefähr 45° von den Kollektorkämmen und 90° zwischen den Bürstenpaaren ist.

Die festen Konduktoren bestehen aus zwei Gabeln mit radial gegeneinandergerichteten Kollektorkämmen, zwischen denen die Scheiben rotieren. Diese Kollektorkämme stehen mit den Konduktorkugeln durch im Viertelkreis gekrümmte Stangen in Verbindung; die gegenseitige Entfernung dieser Kugeln läßt sich mittels Handgriffe aus Ebonit regulieren. Diese Maschine erregt sich vollständig von selbst und soll schon nach drei Umdrehungen der Kurbel ihre volle Kraft auch in sehr feuchter Luft entwickeln. Während bei anderen Influenzmaschinen die Konduktorkugeln während des Betriebs ihre Polarität leicht wechseln, soll das bei dieser Maschine durchaus nicht der Fall sein.

Auf dem Prinzip der Influenzmaschine beruht auch der von W. Thomson konstruierte sogenannte Replenisher

(Wiederfüllungsapparat) oder Multiplikator. Nach Fig. 12 besteht dieser kleine Apparat aus zwei feststehenden cylindrischen Metallsegmenten, den sogenannten Induktoren, welche ein um die Achse b drehbares mit zwei von einander isolierten Metallsegmenten c c′ versehenes Stück umfassen. Die beiden Segmente oder sogenannten Aufnehmer c c′ kommen bei der Drehung abwechselnd mit den Federkontakten d, f und e, g in Berührung, von denen die ersteren durch einen Leitungsdraht unter sich, die beiden anderen mit den Induktoren leitend verbunden sind.

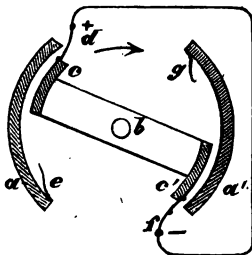


Fig. 12.

Es sei nun angenommen, der Sektor a habe eine positive Ladung, so wird sich der bewegliche Sektor c durch Induktion negativ laden und wird seine Ladung auf den Sektor b übertragen, sobald bei der Rotation in der Pfeilrichtung der Sektor a mit der Feder g in Berührung kommt. Wenn bei weiterer Rotation die Feder f den Sektor a berührt, ladet derselbe sich durch Induktion vom Sektor a′ positiv und überträgt seine Ladung durch Berührung der Feder e auf den Sektor a und so fort. Genau dasselbe findet betreffs der negativen Ladung des drehbaren Sektors statt. Auf diese Weise verstärken sich während der Rotation die Ladungen der Träger c, c′, daher die Bezeichnung „Multiplikator". W. Thomson konstruierte diesen Apparat zur Ladung der beweglichen Lamelle seines Quadrantenelektrometers. Auch wird derselbe zur Herstellung elektrischer Gasanzünder und ähnlicher Apparate benutzt. Eine ganz geringe anfängliche elektrische Ladung genügt, um den Apparat dauernd betriebsfähig zu machen.

Siebentes Kapitel.

Die elektrischen Kondensatoren.

22. **Das Prinzip der elektrischen Kondensation.** — Die elektrische Kondensation beruht auf der Reaktion oder Gegeneinanderwirkung elektrisch geladener Körper, wodurch es ermöglicht wird, einem Körper eine bedeutend stärkere elektrische Ladung mitzuteilen, als wenn derselbe nicht der Gegenwirkung des andern elektrisierungsfähigen Körpers ausgesetzt wäre. Ein Apparat zur Darstellung dieser Erscheinung wurde unter der Bezeichnung Plattenkondensator bereits 1760 von Aepinus hergestellt. Die Wirkungsweise dieses Apparats macht das Prinzip der Kondensation am besten verständlich.

Der Aepinussche Plattenkondensator (Fig. 13) besteht aus zwei vertikal auf Glassäulen befestigten und somit vom Erdboden isolierten kreisrunden Messingscheiben A und B, von etwa 10 cm Durchmesser, die einander mit parallelen Flächen gegenüberstehen und in dieser Stellung auf dem Grundbrett verschiebbar sind, um ihre gegenseitige Entfernung verändern zu können. Ferner sind die Scheiben zur Kontrollierung ihrer elektrischen Ladung an der Außenseite je mit einem elektrischen Pendel a und b versehen. Man denke sich nun die Platte B vorläufig hinweggenommen und die Platte A mit einer Elektrizitätsquelle verbunden, von welcher sie eine positive Ladung empfängt. Hierauf wird die Verbindung mit der Elektrizitätsquelle unterbrochen und der positiv geladenen Platte A die Platte B genähert. Hierbei fällt das vorher durch die Ladung abgestoßene Pendel a zurück, während das Pendel b ausschlägt, jedoch

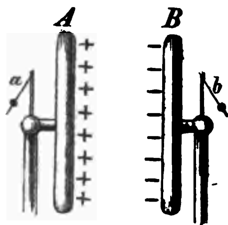


Fig. 13.

weniger stark als vorher das Pendel a. Die positive Oberflächenladung der Platte A ist alsdann auf der nach B zunächst liegenden Seite verdichtet worden, während die vorläufig isolierte Platte B an der Vorderseite negativ, an der Rückseite positiv geladen ist. Die Platte A kann wiederum Elektrizität von der Quelle aufnehmen, bis ihr Pendel a seinen Maximalausschlag wieder erreicht hat und der Ausschlag des Pendels b sich vergrößert. Hebt man die Verbindung von A mit der Quelle auf und berührt B, so fällt das Pendel b ganz herab, zum Beweis, daß die Platte B entladen ist, wogegen das Pendel a sich senkt, weil die an der Vorderseite von A verdichtete Elektrizität sich über die ganze Oberfläche von A dem Gleichgewichtszustande entsprechend verteilt. Verbindet man dann, im weitergehenden Versuch, die Platte A wieder mit der Quelle und die Platte B mit der Erde, so hebt sich das Pendel b gar nicht, während das Pendel a allmählich bis zu seinem Maximalausschlag emporsteigt; es ist dann der elektrische Gleichgewichtszustand zwischen den beiden Kondensatorplatten hergestellt, wobei die Platte A unter der Mitwirkung der Influenz eine viel größere Elektrizitätsmenge aufgenommen hat, als wenn sie ohne die Gegenwirkung der anderen Platte mittels der Elektrizitätsquelle geladen worden wäre.

Die Wirkung der auf diese Weise auf beiden Platten angehäuften, das ist kondensierten (verdichteten) Elektrizitätsmengen ist nach außen hin verhältnismäßig sehr schwach, weshalb man sagt, die beiden einander gegenüber liegenden entgegengesetzten Elektrizitätsmengen seien auf den Kondensatorplatten gebunden, indem dieselben ihre äußere Wirkung gegenseitig aufheben oder ausgleichen. Bei alledem befinden sich aber diese elektrischen Ladungen im gewöhnlichen Zustande und ein mit der Oberfläche der einen oder anderen Platte in Berührung gebrachtes Probescheibchen nimmt die der Berührungsstelle entsprechende Ladung auf. Man kann auch mittels des Elektrometers nachweisen, daß die auf den Platten verdichteten Elektri-

zitäten ihre entsprechende Anziehungs- oder Abstoßungskraft ganz wie im freien Zustande ausüben, so daß man eigentlich nicht von gebundener Elektrizität in diesem Falle reden kann.

Nähert und entfernt man die beiden Kondensatorplatten gegen einander, so nimmt im ersten Falle die Verdichtung an den zunächst befindlichen Seiten zu, im anderen Falle ab. Um bei der Annäherung der Platten eine Entladung zu verhüten, stellt man zwischen denselben eine Glasplatte auf. Die einander nahe gestellten geladenen Platten eines Kondensators entladen sich langsam durch die Glasplatte hindurch; eine rasche Entladung kann man herbeiführen, wenn man die Platten ohne die schützende Glasplatte einander gehörig nähert, oder wenn man beide Platten mittels eines Entladers in Verbindung bringt. Bei starker Ladung ist eine plötzliche Entladung mit der Hand zu vermeiden, jedoch kann man durch abwechselnde Berührung der Platten eine allmähliche Entladung herbeiführen.

23. **Die Herstellung der Kondensatoren.** — Für die Zwecke der Elektrotechnik, für welche neuerdings die Kondensatoren insbesondere mit Bezug auf den Wechselstrombetrieb von Motoren Wichtigkeit erlangt haben, können dieselben einfach aus übereinandergelegten Stanniolblättern mit isolierenden Zwischenlagen von Glimmer oder paraffiniertem oder auch mit Schellackfirnis überzogenem Papier bestehen. In mancher Beziehung vorzüglicher aber auch kostspieliger sind die mittels Glasplatten hergestellten Kondensatoren, wobei das Glas als Dielektrikum zum Auseinanderhalten und Isolieren der Stanniolplatten benutzt wird. Noch vollkommener sind die sogenannten Luftkondensatoren, welche aus einer mehr oder minder großen Anzahl von Glasplatten bestehen, die in geeigneter Weise mit Stanniol bekleidet und durch Luftzwischenräume von etwa 2.5 mm Dicke von einander getrennt sind. Die mit Anwendung von Glas hergestellten Kondensatoren haben den Nachteil der Zerbrechlichkeit und die Luftkondensatoren werden dabei auch noch verhältnismäßig sehr voluminös.

Bei der Benutzung können die Kondensatoren entsprechend dem Bedürfnis nach hoher Spannung oder nach starker Ladung hintereinander oder parallel geschaltet werden, indem man entweder die entgegengesetzt geladenen oder die gleichartig geladenen Platten mehrerer Kondensatoren unter einander verbindet.

Alle Kondensatoren haben die Eigentümlichkeit, daß sie eine um so größere Ladung aufnehmen, je länger sie mit der Elektrizitätsquelle verbunden sind; indem die elektrische Ladung allmählich bis zu einer gewissen Dicke in das Dielektrikum eindringt. Diese Erscheinung wird als Absorption bezeichnet. Die vom Dielektrikum absorbierte Elektrizität wird bei Kurzschluß der Platten nicht gänzlich abgegeben. Löst man den Kurzschluß und überläßt den mit Absorption behafteten Kondensator eine Zeit lang sich selbst, so findet man bei Wiederholung des Kurzschlusses, daß der Kondensator sich wiederum bis zu einem gewissen Grade geladen hat. Bei Wiederholung des Verfahrens kann diese immer schwächer auftretende Wiederladung mehrfach beobachtet werden.

24. **Kapazität der Kondensatoren.** — Bezeichnet man die Gesamtoberfläche zweier ein Element des Kondensators bildender leitender Flächen mit S in Quadratcentimetern und mit l ihre gegenseitige Entfernung in Centimetern, so ist die Kapazität dieses Kondensatorelementes auszudrücken durch

$$C = \frac{S}{4\pi l} \text{ Centimeter}$$

oder

$$C = \frac{S}{9.10^{20}\, 4\pi l} \text{ elektromagnetische C. G. S.-Einheiten,}$$

oder

$$C = \frac{S}{9.10^{11}\, 4\pi l} \text{ Farad}$$

oder

$$C = \frac{S}{9.10^{5}\, 4\pi l} \text{ Mikrofarad*)}$$

*) Man vergl. achtes Kapitel.

Diese Formeln ergeben indessen nur angenäherte Werte, weil die Dichtigkeit der Ladung sich nach dem Rande der Platten verstärkt. Mit Rücksicht hierauf hat W. Thomson bei seinem absoluten statischen Elektrometer die beiden benutzten Kondensatorplatten mit einem Schutzring versehen, wodurch die Ladung des zentralen Teiles gleichförmig gemacht wird.

Die oben besprochene Erscheinung der Absorption bewirkt, daß ein Kondensator sich nicht auf einmal entladet.

25. **Induktive spezifische Kapazität der Dielektrika.** — Nach Faraday versteht man darunter das Verhältnis der Ladung, welche ein durch Dielektrika gebildeter Kondensator aufnimmt, zu derjenigen Ladung, welche derselbe Kondensator unter sonst gleichen Umständen bei Ersetzung der bezüglichen Dielektrika durch Luft aufnimmt.

Setzt man die induktive spezifische Kapazität der Luft gleich Eins, so erhält man für Ladungen von kurzer Dauer die folgenden Verhältniszahlen für die gebräuchlichsten Dielektrika:

Luft	1.	Ebonit	2.4
Paraffin	1.9 —1.96	Schwefel	3.15
Reiner Kautschuk	2.34	Schellack	3.84
Vulkan. Kautschuk	2.94	Guttapercha	4.2
Harz	2.55	Glimmer	5.

Achtes Kapitel.

Die Einheiten des elektrostatischen Systems.

26. **Das elektrostatische C. G. S.-System.** — Unter den elektrostatischen Einheiten des C. G. S.-Systems versteht man die nach Centimeter, Gramm und Sekunde ausgedrückten Maße für die verschiedenartigen, als Größen in Rechnung zu ziehenden und als gegenüber anderen Elektrizitätserscheinungen als relativ statische Zustände anzusehenden Wahrnehmungen, wie Elektrizitätsmenge, elektrische

Dichte, elektrisches Feld, Potential, Kraftfluß oder elektrische Kraftlinienzahl, Kapazität u. s. w. Als Grundlage des elektrostatischen Systems ist die Coulombsche Formel (S. 29) anzusehen.

27. **Die statische Elektrizitätsmenge.** — Wenn zwei elektrische Ladungen q und q^1 aus der Entfernung d auf einander einwirken, so erfolgt eine Anziehung, wenn beide Größen dem Zeichen nach ungleich, eine Abstoßung, wenn beide Größen dem Zeichen nach gleich sind. Die dabei auftretende, mit ihrem Arbeitsdifferentiale, das heißt ihrer Beschleunigung wirksame Kraft wird bestimmt durch die Coulombsche Formel

$$F = \frac{q\,q^1}{d^2}$$

Für $q = q^1$ ist $F d^2 = q$ und folglich

$$q = d\sqrt{F}.$$

Die Dimensionen der Elektrizitätsmenge oder elektrischen Masse im elektrostatischen System sind daher

$$q = L\sqrt{M L T^{-2}} = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}.$$

Die statische Einheit der Elektrizitätsmenge nach dem C. G. S.-System ist diejenige Menge, welche eine gleich große in der Entfernung von 1 cm befindliche Elektrizitätsmenge mit der Kraft von 1 Dyn abstößt.

28. **Die elektrische Dichte.** — Ist eine Elektrizitätsmenge Q auf der Oberfläche eines Körpers oder auf einem Teile dieser Oberfläche gleichmäßig verteilt, und bezeichnet man die betreffende Fläche mit S, so ist die elektrische Dichte der Ladung

$$\delta = \frac{Q}{S},$$

woraus für die elektrische Dichte die Dimensionsformel sich ergiebt

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

Die statische Einheit der elektrischen Dichte nach dem C. G. S.-System ist die Dichte einer nach demselben System bestimmten statischen Elektrizitätsmenge Eins, welche gleichmäßig auf der Fläche von 1 qcm verteilt ist. Bei ungleichmäßiger Verteilung der Elektrizität auf einer Körperoberfläche gilt diese Bestimmung der Dichte natürlich nur für einen entsprechend kleinen Teil der Oberfläche.

28. **Elektrisches Feld.** — Hiermit wird der Raum bezeichnet, der eine elektrische Klasse oder ein elektrisches Massensystem umgiebt und welcher von der elektrischen Kraft, das ist von dem Kraftflusse oder den Kraftlinien durchstrahlt wird. Dieser Kraftfluß giebt die Richtung an, in welcher die elektrische Kraft oder Induktion wirksam ist. Für das elektrische Feld als Ganzes, das ist als ein mit lebendiger Kraft oder mit einer gewissen Energiegröße oder einem Arbeitsleistungsvermögen erfülltes Raumvolumen, gilt dieselbe Dimensionsformel wie für die magnetomotorische Kraft, mit welcher ein magnetisches Feld in ganz ähnlicher Weise erfüllt zu denken ist. Diese Formel ist

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{5}{2}} T^{-1}.$$

29. **Elektrischer Kraftfluß oder elektrische Kraftlinienzahl.** — Denkt man sich durch einen Kraftstrahl des elektrischen Feldes in irgend einer Entfernung vom Kraftzentrum normal zu dem Strahl eine kleine konzentrische Kreisfläche als Differential einer Potentialfläche gelegt, so wird dieses Flächendifferential von einem elektrischen Kraftflusse oder einer entsprechenden Kraftlinienzahl durchdrungen und die betreffende Größe des Kraftflusses oder der Kraftlinienzahl wird bestimmt durch die in dem betreffenden Punkte vorhandene Intensität des Kraftfeldes mal dem betreffenden Flächendifferential d S. Da nach dem Gesetz der Erhaltung der Energie in allen (kugelförmig gedachten) Potentialflächen im ganzen stets eine der ursprünglichen Energiegröße gleiche Energiegröße wirksam ist, und für den Radius Eins eine Kugelfläche durch 4π bestimmt ist, so ist der in einer Potentialfläche im

ganzen von einer Elektrizitätsmenge q ausgehende Kraftfluß bestimmt durch $4\pi q$. Für eine positive Elektrizitätsmenge gilt der Kraftfluß als positiv, für eine negative Elektrizitätsmenge als negativ.

Die Dimensionsformel des Kraftflusses im elektrostatischen System ist

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}.$$

30. **Das elektrostatische Potential.** — Das Potential bezw. die Potentialdifferenz in einem Punkte des elektrischen Kraftfeldes wird bestimmt durch das Verhältnis der das Potential hervorrufenden Elektrizitätsmenge der Ladung q zu der Entfernung d des betreffenden Punktes, das ist q/d. Die Dimensionen des Potentials im elektrostatischen System sind daher

$$\frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}}{L} = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

Während der elektrische Kraftfluß die von einer Elektrizitätsmenge auf einen Punkt des Kraftfeldes ausgeübte Arbeitsleistung darstellt, kommt dem Potential die in diesem Punkte wirksame, jener Arbeitsleistung entsprechende Kraft zu.

Einem Punkte des elektrischen Kraftfeldes kommt daher die nach dem C. G. S.-System bestimmte Einheit des Potentials zu, wenn derselbe sich in der Entfernung von 1 cm von einer Ladung befindet, die gleich der nach dem C. G. S.-System bestimmten elektrostatischen Einheit der Elektrizitätsmenge ist.

Die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten des elektrischen Kraftfeldes ist das Verhältnis der Arbeitsleistung A, welche aufgewendet werden muß, um eine positive Elektrizitätsmenge q von dem einen der betreffenden Punkte zum andern zu bringen, zu dieser Elektrizitätsmenge, also A/q.

Zwischen zwei Punkten des elektrischen Kraftfeldes besteht die elektrostatische Potentialdifferenz Eins des C.G.S.-Systems, wenn die Arbeit von 1 Erg aufgewendet werden muß, um eine Ladung gleich der elektrostatischen C. G. S. - Einheit

der Elektrizitätsmenge von dem einen Punkte zum andern zu bringen.

31. **Intensität des elektrischen Kraftfeldes oder elektrische Kraft.** — Der Quotient aus der an einer beliebigen Stelle eines elektrischen Kraftfeldes herrschenden Kraft F durch die dieser Kraft entsprechende Elektrizitätsmenge Q, das heißt die der Einheit der Elektrizitätsmenge Q zukommende Kraft, welche Einheit durch F/Q ausgedrückt wird, wird mit Bezug auf die betreffende Stelle als die Intensität des elektrischen Kraftfeldes oder kurzweg als die elektrische Kraft bezeichnet. Läßt man dagegen die Bezeichnung Q für die Größe des Potentiales V der das elektrische Feld hervorrufenden Elektrizitätsmenge gelten, so ist unter Intensität des Feldes diejenige Kraft zu verstehen, welche durch die von jenem Potentiale ausgeübte Arbeit in einer beliebigen Entfernung l hervorgerufen wird, so daß man demnach die Intensität des Feldes gleich V/l zu setzen hat. In beiden Fällen erhält man für die Intensität des elektrischen Kraftfeldes die Dimensionen

$$M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

Ein Punkt des elektrischen Feldes hat eine Intensität gleich der elektrostatischen C. G. S.-Einheit, wenn derselbe eine Kraft gleich 1 Dyn auf eine Elektrizitätsmenge gleich der elektrostatischen C. G. S.-Einheit der Elektrizitätsmenge ausübt.

32. **Kapazität.** — Mit Bezug darauf, daß die Ladung, das ist die Elektrizitätsmenge Q und das Potential V einer elektrischen Masse in Proportionalität, das heißt in einem konstanten Verhältnis C zu einander stehen, wird dieses Verhältnis als elektrische Kapazität des geladenen Körpers bezeichnet. Das Potential in irgend einem Punkte im Innern des Körpers muß konstant sein und hat daher in irgend einem Punkte im Innern oder auf der Oberfläche denselben Wert wie im Mittelpunkte, sobald der Körper kugelförmig ist. Ist r der Radius der Kugel, so ist $V = \frac{A}{r}$ oder $Q = Vr$.

Dritter Abschnitt.

Die Lehre von dem elektrischen Strome.

Neuntes Kapitel.

Der elektrische Strom.

33. **Entladung und elektrischer Strom.** — Da bei der Entladung statischer Elektrizität stets nur eine verhältnismäßig sehr geringe Elektrizitätsmenge zur Entladung kommt, so entsteht immer nur ein momentaner Strom, der aber infolge der ihn erzeugenden hohen Potentialdifferenz gleichwohl eine starke stoßartige Wirkung hervorbringen kann. Der elektrische Dauerstrom oder kurz der elektrische Strom im elektrodynamischen Sinne wird durch einen mehr oder minder lange andauernden und möglicherweise beliebig lange konstant zu erhaltenden Energieaufwand, das ist durch eine dauernde Arbeitsleistung erzeugt, so daß nach der gewöhnlichen Ansicht der Leitungsdraht von einem dauernden Elektrizitätsstrom durchlaufen wird, dessen Stärke der in der Sekunde durch einen Querschnitt der Leitung gehenden Elektrizitätsmenge proportional ist. Dieser Strom läßt sich auf verschiedene Weise erzeugen, indem dazu die chemische Wirkung galvanischer Batterien, die Wärme durch Thermosäulen und, unter Benutzung eines magnetischen Kraftfeldes, mechanischer Kraftaufwand benutzt werden kann. Bezeichnet man die während eines Zeitverlaufes von t Sekunden durch

den Leitungsdraht gehende Elektrizitätsmenge mit Q, so wird durch den Quotienten Q/t die Stromstärke I bestimmt und es gelten also die Gleichungen:

$$I = \frac{Q}{t} \text{ und } I\,t = Q.$$

34. Entstehung des elektrischen Stromes. — Der elektrische Strom entsteht dadurch, daß mittels eines Aufwandes von Energie oder Arbeitsleistung an den Enden des Leitungsdrahtes verschiedene Potentiale erzeugt und somit eine Potentialdifferenz $V - V^1$ wirksam gemacht wird, die durch eine den Strom treibende elektrodynamische oder elektromotorische Kraft E sich geltend macht, wobei die Stromstärke dieser elektromotorischen Kraft direkt proportional und dem in der Leitung vorhandenen Widerstande umgekehrt proportional ist. Diese Bedingungen sind festgestellt durch das Ohmsche Gesetz. Bezeichnet man also die elektromotorische Kraft mit E, die Stromstärke mit I und den Leitungswiderstand mit R, so gelten nach dem Ohmschen Gesetz die Gleichungen:

$$E = I\,R,$$

$$I = \frac{E}{R},$$

$$R = \frac{E}{I}.$$

Bezeichnet man mit l die Länge eines Leiters vom gleichförmigen Querschnitt s und mit a den von der Natur des Leitermaterials abhängigen sogenannten spezifischen Widerstand, so gilt nach der gebräuchlichen Annahme für den Ohmschen Widerstand dieses Leiters die Gleichung

$$R = a\,\frac{l}{s}.$$

Setzt man diesen Wert für R in der vorher aufgestellten Gleichung um, so erhält man

$$E = I\,.\,a\frac{l}{s}$$

und somit würde die Dimensionsformel für die elektromotorische Kraft sich ergeben in der Form

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1},$$

während man für gewöhnlich dafür die Dimensionsformel

$$E = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}$$

setzt*).

35. **Die Kirchhoffschen Gesetze der Stromverteilung.** — Bezüglich der Verteilung von elektrischen Strömen hat Kirchhoff die folgenden beiden Gesetze aufgestellt:

Erstes Kirchhoffsches Gesetz: Die algebraische Summe der durch die Verzweigungen eines Stromkreises fließenden elektrischen Ströme ist in den Vereinigungspunkten der Verzweigungen des Stromkreises gleich Null, wobei man die Ströme, die sich einem Vereinigungspunkte nähern, als positiv, dagegen die Ströme, die sich von einem Vereinigungspunkte entfernen, als negativ bezeichnet.

Zweites Kirchhoffsches Gesetz: In einem Leitersystem, das einen geschlossenen Stromkreis bildet, ist die Summe der Produkte aus dem Widerstande jedes Leiters und der Stärke des denselben Leiter durchfließenden Stromes gleich der algebraischen Summe der elektromotorischen Kräfte, die in dem geschlossenen Stromkreise wirksam sind. Hierbei betrachtet man diejenigen elektromotorischen Kräfte als positiv, die die Stromstärke zu vergrößern suchen, und diejenigen elektromotorischen Kräfte als negativ, die die Stromstärke zu verkleinern suchen.

Diese zwei Kirchhoffschen Gesetze sind nur auf ein solches geschlossenes Leitersystem anzuwenden, worin die Widerstände und die elektromotorischen Kräfte konstant bleiben. Die Stromstärken bleiben dann von selbst konstant und bilden ein gleichbleibendes Wirkungssystem.

*) Bezüglich ausführlicher und rationeller Entwickelung dieser Formeln ist auf die Schrift: „Elektrizität und Schwerkraft im Lichte einheitlicher Naturanschauung" von Th. Schwartze. Berlin 1892, Verlag der Polytechnischen Buchhandlung, zu verweisen.

Mit Bezug hierauf haben diese Gesetze besonders zur Begründung gewisser elektrischer Meßmethoden gedient.

Aber auch dann, wenn die Ströme in einem geschlossenen Leitersystem veränderlich oder periodisch sind, behält nicht nur das Ohmsche Gesetz seine Gültigkeit, sondern es sind auch noch die beiden Kirchhoffschen Gesetze in Anwendung zu bringen.

36. Die Schaltung von Widerständen. — Man hat in der elektrotechnischen Praxis die Hintereinanderschaltung oder Reihenschaltung und die Parallelschaltung der Widerstände zu unterscheiden. Schaltet man eine beliebige Anzahl von Widerständen hinter einander, das ist auf Spannung, so ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe dieser einzelnen zusammengeschalteten Widerstände, also etwa

$$R = r_1 + r_2 + \ldots + r_n.$$

Schaltet man dagegen eine beliebige Anzahl Widerstände zwischen zwei Punkten eines Stromkreises parallel, das ist neben einander, so ist stets der Gesamtwiderstand dieser parallel geschalteten Widerstände kleiner als der kleinste Widerstand in ihrer Reihe.

Werden z. B. zwischen zwei Punkten A und B eines Stromkreises zwei Widerstände r_1 und r_2 parallel geschaltet, so verteilt sich der im ersten Punkte A ankommende Strom I in zwei Zweigströme (derivierte Ströme), deren Stärken i_1 und i_2 den betreffenden Widerständen umgekehrt proportional sind.

Bezeichnet man die zwischen den beiden Punkten A und B des Stromkreises herrschende Potentialdifferenz mit e und den bezüglichen Gesamtwiderstand oder reduzierten Widerstand mit R, so gelten die Gleichungen

$$I = i_1 = i_2, \quad R = r_1 + r_2$$

$$e = i_1 r_1 = i_2 r_2$$

folglich auch

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

$$I = \frac{e}{r_1} + \frac{e}{r_2} = \frac{e}{R}$$

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}.$$

Für eine beliebige Anzahl parallel geschalteter Widerstände r_1 bis r_n folgt also ohne weiteres der reduzierte Widerstand

$$R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \cdots + \frac{1}{r_n}}.$$

Sind die n parallel geschalteten Widerstände einander gleich, so ist

$$R = \frac{r}{n}.$$

37. **Stromwärme und Joulesches Gesetz.** — Wenn ein Strom durch einen Leiter geht, in welchem der Strom nicht zur Verrichtung einer Arbeitsleistung nach außen wie Lichterzeugung, chemische Wirkung u. s. w. verwendet wird, sondern nur der sogenannte Leiterwiderstand von dem elektrischen Strome zu überwinden ist, so wird ein diesem Widerstande entsprechender Teil der im ganzen Stromkreise wirksamen elektrischen Energie in Wärme umgewandelt und der betreffende, einen Teil des Stromkreises bildende Leiter entsprechend erhitzt. Aber auch ganz allgemein wird in jedem Stromkreise ein größerer oder geringerer, durch die Umstände bedingter Teil der elektrischen Energie in Wärme umgewandelt. Zieht man nun einen Teil des Stromkreises in Betracht, innerhalb dessen keine elektrische Energie zu äußerer Arbeit verwendet wird und in welchem also auch keine elektromotorische Kraft nach außen wirksam ist, so besteht zwischen den Endpunkten dieses Teiles der Leitung eine gewisse Potentialdifferenz oder elektromotorische Kraft e, die eben nur zur Unterhaltung des elektrischen Stromes i

dient, indem sie, wie man annimmt, diesen Strom durch den Widerstand r der betrachteten Leitungslänge zu treiben hat. In einer gewissen Zeit t wird dadurch innerhalb dieser Leitungslänge eine entsprechende Molekulararbeit geleistet, deren Größe nach der von Joule aufgestellten Formel bestimmt wird. Diese das Joulesche Gesetz oder den Joule-Effekt ausdrückende Formel ist

$$eit = i^2rt \text{ Joule-Einheiten.}$$

Da nun nach dem C. G. S.-System eine Wärmeeinheit oder Kalorie 0.00425 Centimetergrammen entspricht, so ergiebt sich der Joule-Effekt in Wärmeeinheiten oder Centigraden der Thermometerskala ausgedrückt zu

$$W = 0.24\, ri^2t \text{ Gramm-Kalorien.}$$

Zehntes Kapitel.

Die chemische Wirkung des elektrischen Stromes.

38. Die Elektrolyse. — Wird ein elektrischer Stromkreis durch chemisch zusammengesetzte, d. h. aus mehreren Elementarstoffen gebildete Flüssigkeit unterbrochen, indem an der Unterbrechungsstelle die Enden der Stromleitung mittels geeigneter Elektroden, d. h. mittels besonderer, mit der Stromleitung verbundener leitender Stäbe oder Platten in die Flüssigkeit eingetaucht werden, so daß der elektrische Strom die Flüssigkeit von einer Elektrode zur andern durchdringen muß, so wird die Flüssigkeit chemisch in ihre einfacheren oder auch einfachsten Bestandteile zerlegt. Diese elektrochemische Wirkung des Stromes ist von Faraday als Elektrolyse bezeichnet worden. Die der Zersetzung unterworfene Flüssigkeit wird als Elektrolyt bezeichnet; die positive Elektrode, durch welche der Strom in die Flüssigkeit eintritt, wird als Anode, die negative Elektrode, durch welche der Strom die Flüssig-

keit verläßt, als Kathode bezeichnet; die durch die Elektrolyse aus der Flüssigkeit an den Elektroden abgeschiedenen Stoffe werden Jonen genannt, und zwar unterscheidet man hier wieder als Anion das an der Anode abgeschiedene Zersetzungsprodukt vom Kathion, dem an der Kathode abgeschiedenen Zersetzungsprodukt.

39. **Elektrochemisches Äquivalent.** — Unter elektrochemischem Äquivalent eines Stoffes versteht man die durch die Einheit der Elektrizitätsmenge (Coulomb) ausgeschiedene Gewichtsmenge einer Jone oder die durch die Einheit der Elektrizitätsmenge ausgeschiedene Gewichtsmenge eines Elektrolyts, wobei die wirksame Elektrizitätsmenge stets zu der ausgeschiedenen Stoffmenge in einem für die Art des Stoffes charakteristischen Verhältnis steht.

40. **Gesetze der Elektrolyse.** — Faraday hat für den elektrolytischen Vorgang die folgenden beiden Gesetze aufgestellt:

1. Die Gewichte der aus dem Elektrolyt ausgeschiedenen Zersetzungsprodukte (Jonen) sind den durch die Flüssigkeit geführten Elektrizitätsmengen proportional, oder mit anderen Worten: Die von verschiedenen Strömen in gleicher Zeit zersetzten Gewichtsmengen eines und desselben Elektrolyts sind den Stromstärken proportional.

2. Die Gewichte der mittels desselben Stromes in derselben Zeit zersetzten verschiedenartigen Elektrolyte entsprechen den chemischen Äquivalenten dieser Elektrolyte.

Hieraus folgt, daß die elektromotorische Kraft eines Elektrolytes dem mechanischen Äquivalent der Verbindungswärme seines elektrochemischen Äquivalents gleich ist.

Die Zersetzung eines Elektrolytes tritt ein, sobald die geringste elektromotorische Kraft in dessen Masse wirksam wird. Bei konstantem Strome sind die in verschiedenen Zeiten zersetzten Gewichtsmengen eines Elektrolytes den Zeiten der Stromwirkung proportional.

41. Die Polarisation. — Die Elektrolyse wird beeinträchtigt durch die Polarisation der Elektroden und diese Polarisation ist abhängig von der chemischen, sowie mechanischen Beschaffenheit der Elektroden und des Elektrolyts, von der Stromdichte und anderen Umständen. Es entspricht die Polarisation einer elektromotorischen Gegenkraft, welche sich im Verlauf der Elektrolyse bis auf ein gewisses Maximum steigert. Die elektromotorische Kraft der Polarisation ist von der Stromstärke abhängig. William Thomson hat nachgewiesen, daß man (unter der Voraussetzung, daß keine sekundären Wirkungen eintreten) die elektromotorische Kraft der Polarisation berechnen kann, wenn man die chemische Energie der elektrolytischen Verbindung kennt. Es ist nämlich die vom Elektrolyt aufgenommene elektrische Arbeit, die durch das Produkt der elektromotorischen Kraft der Polarisation und der Stromstärke gegeben ist, gleich der in absoluten Einheiten ausgedrückten Verbindungswärme der in der Sekunde zersetzten Gewichtsmenge des Elektrolyts. Bezeichnet man mit p das elektrochemische Äquivalent des Elektrolyts und mit c die Verbindungswärme von der Gewichtseinheit desselben, so hat man:

$$e\,i = p\,c\,i \text{ oder } e = p\,c.$$

Mit Berücksichtigung dieses Gesetzes kann man die elementaren Bestandteile eines gemischten Elektrolyts nach einander abscheiden. Ist zum Beispiel ein Gemisch aus schwefelsaurem Zink und Kupfer gegeben, so kann man, da die Verbindungswärme des schwefelsauren Kupfers geringer ist, als die des schwefelsauren Zinks, durch geeignete Regelung der Potentialdifferenz zuerst das Kupfer und dann das Zink auf der Kathode abscheiden.

42. Das elektrochemische Äquivalent und dessen Wert für die hauptsächlichsten Stoffe. — Bezüglich eines durch den elektrischen Strom ausgeschiedenen oder bei Elektrizitätsentwicklung in Verbindung tretenden Stoffes versteht man unter dessen elektrochemischem Äquivalent das Verhältnis

von dessen freiwerdender oder aufgenommener Masse zur Menge der dabei in Wirksamkeit tretenden Elektrizität. Bezeichnet man mit m die Masse des betrachteten Stoffes, mit z dessen elektrochemisches Äquivalent und mit q die dabei wirksame Elektrizitätsmenge, so ist

$$z = \frac{m}{q}.$$

Im C. G. S.-System wird das elektrochemische Äquivalent ausgedrückt durch die Gramm-Masse, d. i. durch die Einheit der Elektrizitätsmenge. Ist das elektrochemische Äquivalent für einen Elementarstoff, zum Beispiel für den Wasserstoff, bekannt, so erhält man die elektrochemischen Äquivalente aller übrigen Elementarstoffe, indem man den bekannten Wert von z mit den Zahlenwerten der Äquivalente der anderen Elementarstoffe multipliziert, wobei das chemische Äquivalent des als Ausgangspunkt dienenden Elementarstoffes als Einheit angenommen ist. Die in dem Zeitverlauf t freigewordene oder chemisch gebundene Masse m eines Körpers wird bestimmt durch die Gleichung:

$$m = z I t,$$

wenn I die Stromstärke in C. G. S.-Einheiten bezeichnet. In der folgenden Zusammenstellung sind die elektrochemischen Äquivalente der hauptsächlichsten Elementarstoffe angegeben. Die Werte sind in der Weise bestimmt worden, daß das chemische Äquivalent des betreffenden Elementarstoffes mit dem elektrochemischen Äquivalent des Wasserstoffs multipliziert wurde.

Tabelle der elektrochemischen Äquivalente.

Ionen der Elementarstoffe	Chemisches Äquivalentgewicht	Elektrochem. Äquivalent in Milligrammen pro Coulomb	In Grammen pro Ampère-Stunde
Elektropositive Stoffe:			
Wasserstoff	1	0.01036	0.04029
Kalium	39	0.40404	1.45454
Natrium	23	0.23828	0.85781
Gold	196.7	2.08781	7.51612
Silber	108	1.21888	3.16909
Aluminium	13.75	0.14245	0.51282
Kupfer	31.7	0.32893	1.18415
Quecksilber	100	1.03600	3.72960
Zinn	59	0.61127	2.20057
Eisen	50	0.29048	1.04573
Nickel	29	0.30047	1.08169
Zink	32.5	0.33670	1.21212
Blei	103.5	1.10326	4.07174
Elektronegat. Stoffe:			
Sauerstoff	8	0.08288	0.21549
Chlor	35.5	0.36778	1.22401
Jod	127	1.31572	4.73659
Brom	80	0.82880	2.15488
Stickstoff	14	0.14504	0.52214

Bei der Elektrolyse scheint eine gewisse Energiemenge zu verschwinden; diese Energiemenge ist gleich QE, wobei Q die aufgewendete Elektrizitätsmenge und E eine der wirksamen elektromotorischen Kraft (Potentialdifferenz) der Größe nach gleiche aber negative elektromotorische Gegenkraft ist, die auch als elektromotorische Kraft der Polarisation bezeichnet wird.

Elftes Kapitel.

Die elektrodynamischen Stromwirkungen.

43. **Die Bezeichnungen zwischen Elektrizität und Magnetismus.** — Durch Oersted wurde entdeckt, daß der elektrische Stromkreis einer galvanischen Batterie, also der sogen. galvanische Strom, oder — kurzweg — der elektrische Strom ablenkend auf eine Magnetnadel derartig einwirkt, daß dieselbe von der Richtung des vom Strome durchflossenen Drahtes mehr oder minder abweicht. Denkt man sich nach der sogenannten Ampèreschen Regel den Beobachter so auf den vom elektrischen Strome durchflossenen Draht gelegt, daß der Strom von seinen Füßen nach seinem Kopfe gerichtet ist, und er gegen die Magnetnadel sieht, so wird der Nordpol der Nadel gegen die linke Seite des Beobachters abgelenkt.

Befindet sich die Magnetnadel innerhalb einer Drahtschleife (Fig. 14), so daß oberhalb der Nadel der elektrische

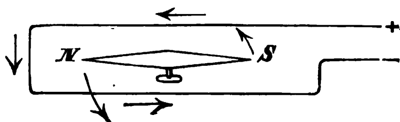


Fig. 14.

Strom nach Norden und unterhalb der Magnetnadel nach Süden gerichtet ist, so wird der Nordpol der Nadel durch den Strom nach Westen abgelenkt.

Es geht daraus hervor, daß um den vom Elektrizitätsstrome durchflossenen Draht ein magnetisches Kraftfeld vorhanden ist. Dieses kann leicht ersichtlich gemacht werden, wenn man den senkrecht gerichteten Draht durch ein mit feinen Eisenfeilspänen bestreutes Kartenblatt führt. Durch leichtes Klopfen an das Kartenblatt ordnen sich alsdann die

Eisenfeilspäne in der durch Fig. 15 angedeuteten Weise. Hieraus folgt, daß ein durch einen Draht gehender Elektrizitätsstrom von magnetischen den Leitungsdraht umkreisenden Wirbelströmen begleitet ist. Bildet dieser Leitungsdraht, etwa in der Weise wie Fig. 14 darstellt, eine Drahtschleife und denkt man sich wiederum den Beobachter so im Drahte liegend, daß er nach dem Innern der Drahtschleife

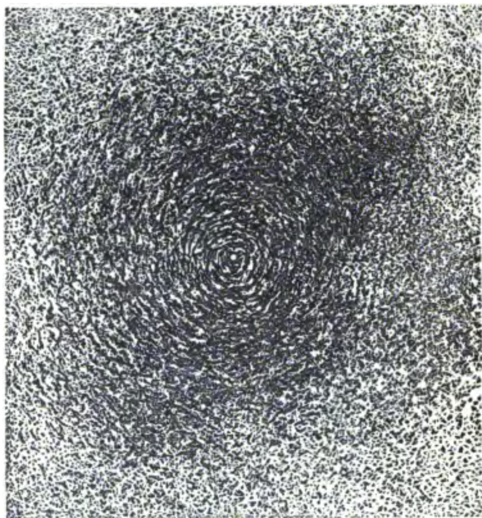


Fig. 15.

blickt, wobei der Elektrizitätsstrom an seinen Füßen ein- und am Kopfe austritt, so werden die ihn umkreisenden magnetischen Ströme an seiner rechten Seite in die Drahtschleife eintreten und an seiner linken Seite austreten. Man hat deshalb anzunehmen, daß für diesen Beobachter ein magnetischer Kraftstrom von rechts nach links durch die Drahtschleife hindurchgeht.

44. Das elektromagnetische Feld. — Ein von einem elektrischen Strome durchflossener geradliniger Draht ist von einem rotierenden elektromagnetischen oder sogenannten galvanischen Felde umgeben. Personifiziert man den Draht, indem man sich statt dessen einen Beobachter denkt, von dessen Füßen der elektrische Strom nach dem Kopfe geht, so dreht sich vor dessen Gesicht das elektromagnetische Feld von rechts nach links, oder blickt man nach der Stromrichtung gegen das elektromagnetische beziehungsweise magnetische Feld, so dreht sich dasselbe in Uhrzeigerrichtung. Für manche Fälle sehr bequem ist auch die von Maxwell angegebene Regel.

Denkt man sich nämlich den elektrischen Strom in der Drehungsrichtung eines Korkziehers fließend (Fig. 16), so

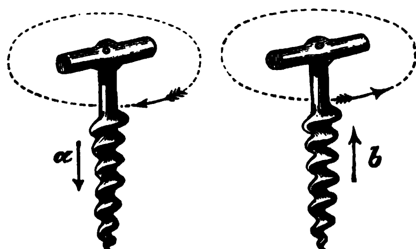


Fig. 16.

fällt die Verschiebungsrichtung des Korkziehers mit der Richtung der Kraftlinien des vom Strome erregten elektromagnetischen Feldes zusammen.

Es folgt aus dieser Beziehung zwischen elektrischen und magnetischen Kraftlinien, daß ein durch einen geschlossenen Leitungsdraht gesendeter magnetischer Kraftstrom (etwa durch Einführung eines Magnetstabes in einen Kupferdrahtring) in diesem Stromkreise einen elektrischen Strom erregt, welcher der Veränderung des magnetischen Drahtstromes entgegenwirkt. Bei Erörterung der Induktion wird dies eingehender besprochen werden.

45. Das Solenoid. — Nach Ampères Theorie des Magnetismus hat man unter einem Solenoid eine Reihe gleicher, ganz nahe aneinander liegender und normal zu einer konzentrischen geraden oder gekrümmten Achse gelagerter elektrischer Ströme sich zu denken. Im praktischen Sinne versteht man darunter einen spiralförmigen, von einem elektrischen Strome durchlaufenen Draht. Aus den vorhergehenden Bemerkungen folgt, daß durch die die Windungen dieses Drahtes umkreisenden elektromagnetischen Ströme innerhalb eines solchen Solenoids ein magnetisches Drahtfeld gebildet wird. Ein Solenoid besitzt daher gleich einem Magnete einen Nordpol und einen Südpol und stellt sich,

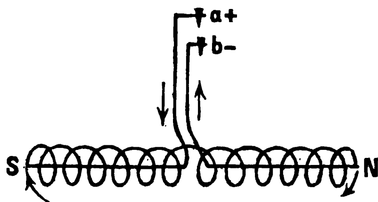


Fig. 17.

wenn in geeigneter Weise, wie Fig. 17 bei a und b andeutet, horizontal aufgehängt, gleich einer Magnetnadel ein. Blickt man so in der Richtung der Längsachse des Solenoids, daß der elektrische Strom die Spirale vom Beobachter weggehend in Uhrzeigerrichtung durchfließt, so hat man das Südende des Solenoids vor sich. Für das Nordende gilt natürlich das Umgekehrte. Denkt man sich den Beobachter in einer der Drahtwindungen liegend, so daß der Strom von dessen Füßen zum Kopfe geht, und streckt dieser nach der Achse des Solenoids blickende Beobachter seine Arme in der Achsenrichtung aus, so weist der linke Arm nach Norden, der rechte Arm nach Süden.

46. Die gegenseitige Einwirkung elektrischer Ströme. — In dieser Beziehung hat Ampère die folgenden beiden Grundgesetze aufgestellt:

1. Zwei parallel gerichtete Ströme oder zwei parallel gerichtete Teile eines Stromkreises ziehen einander an, wenn die Ströme nach derselben Richtung fließen, oder sie stoßen einander ab, wenn sie nach entgegengesetzten Richtungen fließen.

2. Zwei Ströme oder zwei Teile eines Stromkreises, die sich unter einem Winkel kreuzen, ziehen einander an, wenn beide Ströme entweder nach dem Kreuzungspunkte hinfließen, oder wenn beide von dem Kreuzungspunkte fortfließen, und sie stoßen einander ab, wenn der eine Strom nach dem Kreuzungspunkte hin, der andere Strom aber von dem Kreuzungspunkte fortfließt.



Fig. 18.

Dieses Gesetz ist durch Fig. 18 illustriert. Es folgt hieraus im allgemeinen, daß zwei Stromleiter, die sich in irgend einer Lage zu einander befinden, sich immer so zu einander zu stellen suchen, daß ihre Ströme möglichst nahezu nach gleicher Richtung fließen oder, mit andern Worten, sich zu einem Strome vereinigen.

Ein drittes Ampèresches Gesetz besagt:

Die Kraft, die von zwei parallelen Strömen auf einander ausgeübt wird, ist dem Produkte aus den Stromstärken und der Länge der Stromleiter direkt, ihrem Abstande indirekt proportional.

Die bezüglichen Erscheinungen sind als mechanische, d. h. als elektrodynamische Wirkungen der elektrischen Ströme aufzufassen. Sie werden von elektrischen Strömen und

gerade eben so auch von Magneten auf Stromleiter ausgeübt, wenn erstere sowie letztere sich in einem dauernden Zustande befinden. Demzufolge sind diese elektrodynamischen Wirkungen von den im nächsten Kapitel zu besprechenden Induktionswirkungen wesentlich verschieden.

47. **Die Gesetze für die elektrodynamischen Wirkungen der Ströme.** — Wirkt ein unendlich langer (in der Praxis verhältnismäßig sehr langer) Strom i auf einen parallelen Strom i' von endlicher Länge l (also in der Praxis von viel geringerer Länge) aus der Entfernung d, so ist die ausgeübte anziehende oder abstoßende Kraft bestimmt durch die Gleichung:

$$F = \frac{ii'l}{d}.$$

Bezeichnet man F in Dyns, l und d in Centimetern, $i = i'$ in elektromagnetischen Einheiten nach dem C. G. S.-System, so erhält man die Einheit der elektrodynamischen Intensität.

Zwei kreisförmige parallele Ströme vom Radius r und der Entfernung d, deren Intensitäten i und i' sind, üben auf einander eine anziehende oder abstoßende Kraft aus nach der Gleichung:

$$F = 4\pi \frac{r}{d} ii'.$$

Bestehen beide Stromkreise beziehungsweise aus n und n' Drahtwindungen, so besteht die Gleichung:

$$F = 4\pi \frac{r}{d} ni.n'i'.$$

Wenn also zwei Stromkreise von irgend welcher Form, von denen der eine fest, der andere beweglich ist, durch eine Wirkung in ihrer Stellung erhalten werden, die gleich und entgegengesetzt zur elektrodynamischen Wirkung ist, so läßt sich diese Wirkung ersetzen durch eine Kraft oder durch ein Kräftepaar proportional zu dem Produkt der Intensitäten der Ströme, die in den Stromkreisen fließen, und einer

Konstanten k, die nur von den Formen der Stromkreise und ihren relativen Lagen abhängig ist.

Auf diesem Prinzip sind die Konstruktionen der Elektrodynamometer, sowie die elektrischen Arbeitsmesser oder Wattmeter begründet.

48. **Astatische und adynamische Leiter.** — Ein Elektrizitätsleiter wird als astatisch bezeichnet, wenn derselbe von gleichförmiger magnetischer Wirkung nicht beeinflußt wird. Ein Elektrizitätsleiter wird astatisch gemacht, wenn man denselben zu zwei kongruenten Stromkreisen formt, die von gleich starken aber entgegengesetzten Strömen durchflossen werden. Fig. 19 zeigt zwei Formen eines astatischen Leiters.

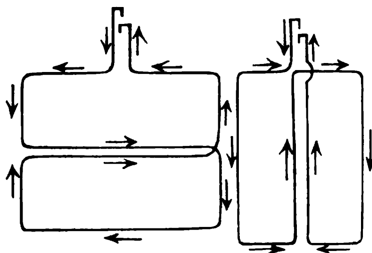


Fig. 19.

Ein adynamischer Leiter ist ein solcher Elektrizitätsleiter, der weder auf Magnete noch auf elektrische Ströme eine Wirkung ausübt, noch davon eine Beeinflussung erleidet. Ein adynamischer Leiter wird gebildet, wenn man einen Draht doppelt oder bifilar, das heißt in zwei parallel neben einander liegenden oder zusammengewundenen Längen auf eine Rolle wickelt, so daß der durchgehende elektrische Strom in der einen Drahtlänge nach der einen Richtung und in der parallelen Drahtlänge in der entgegengesetzten Richtung fließt. Ein adynamischer Leiter ist stets auch astatisch, aber ein astatischer Leiter nicht immer auch adynamisch, indem er bei beweglicher Aufhängung nur in einem gleichförmigen

Magnetfelde unbeweglich bleibt. Bei allen genauen Messungen hat man adynamische Leiter zur gegenseitigen Verbindung der Apparate anzuwenden, um jede elektrodynamische Einwirkung zu verhüten.

49. Anwendung der elektrodynamischen Wirkungen. — Die elektrodynamischen Wirkungen werden fast nur bei der Messung elektrischer Ströme und elektrischer Arbeitsleistungen mittels der Elektrodynamometer in Anwendung gebracht; bei Besprechung der Meßinstrumente wird diese Anwendung erklärt werden.

Zwölftes Kapitel.

Die elektrische Induktion.

50. Die Induktionserscheinungen im allgemeinen. — Im allgemeinen treten die Induktionserscheinungen durch elektrische Ströme infolge von Zustandsänderungen in den Stromkreisen ein. Befindet sich beispielsweise ein von einem elektrischen Strome durchflossener Stromkreis AB (Fig. 20), der zum Zweck der Stromerzeugung mit einer galvanischen Batterie E und zum Zweck der Stromänderung mit einer Ausschaltvorrichtung F versehen ist, in der Nähe eines anderen, an und für sich stromlosen Stromkreises CD, so wird bei auf einander folgendem Öffnen und Schließen des Stromkreises AB mittels der Vorrichtung F im Stromkreise CD ein wechselnder Strom entstehen, der beim Öffnen des wirkenden oder Primärstromkreises AB als Öffnungsstrom mit dem Primärstrome gleiche Richtung, beim Schließen des Primärstromes aber als Schließungsstrom entgegengesetzte Richtung zum Primärstrome hat. Diese im Sekundärstromkreise CD durch Induktion hervorgerufenen Ströme werden im allgemeinen als In-

duktionsströme bezeichnet und sind an und für sich von nur momentaner Dauer. Beim wiederholten raschen Wechsel des Öffnens und Schließens des Primärstromkreises entsteht aber im Sekundärstromkreise ein ununterbrochener Wechselstrom, der mittels geeigneter Vorrichtungen bis auf Tausende

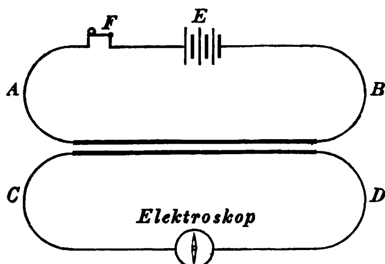


Fig. 20.

von Wechseln in der Sekunde gebracht werden kann. Mittels des im Sekundärstromkreise eingeschalteten, als Elektroskop dienenden Galvanometers kann man am Hin- und Herschwanken der Magnetnadel die wechselnden Induktionsströme verfolgen.

Zur Hervorrufung starker Induktionsströme benutzt man sogenannte Induktionsrollen, das heißt mit umsponnenem Kupferdraht bewickelte Spulen. Ist die Primärspule aus wenig Windungen dicken Drahtes, die Sekundärspule aus verhältnismäßig viel mehr Windungen dünnen Drahtes bewickelt, so ruft ein durch die Primärspule gesendeter starker Strom von schwacher Spannung in der Sekundärspule einen verhältnismäßig schwächeren Strom von entsprechend stärkerer Spannung hervor.

51. **Extraströme und gegenseitige Induktion.** — Extraströme sind Induktionsströme, die beim Öffnen und Schließen des Primärstromes, sowie bei jeder Änderung von dessen Stärke in dessen eigenen Stromkreise durch

gegenseitige Induktion hervorgerufen werden, indem jedes Element des Primärstromkreises nicht nur auf die zunächst befindlichen Elemente eines anderen Stromkreises, sondern auch auf die Elemente des eignen Stromkreises induzierend wirkt.

Ist der Draht des Primärstromkreises in Form von Spiralen in vielen dicht aneinanderliegenden Windungen auf eine Spule gewickelt, so treten die in diesem Stromkreis durch Selbstinduktion hervorgerufenen Extraströme stärker auf und zwar um so stärker, je zahlreicher und dichter die Spiralwindungen neben- und übereinander liegen. Auch bei den Extraströmen ist der Schließungsstrom dem kontinuierlichen Strome entgegen, der Öffnungsstrom aber dem kontinuierlichen Strome gleich gerichtet.

Nach Edlund entsprechen dem Öffnungs- und Schließungsextrastrome gleiche Elektrizitätsmengen, wenn der kontinuierliche Strom in dem Zeitintervall zwischen beiden nicht durch Polarisation in der Batterie geschwächt wird. Ferner sind beide Extraströme der Stromstärke des Primärstromes proportional.

52. **Eigenschaften der induzierten Ströme.** — Die induzierten Ströme unterscheiden sich von dem kontinuierlichen, gleichgerichteten, also etwa von einer galvanischen Batterie erzeugten Strome durch die momentane Dauer, sowie die entsprechend rasch anschwellende und darauf sofort wieder abnehmende Stärke.

Trägt man die Zeitteile als Abscissen auf der horizontalen Linie OX (Fig. 21) und die zugehörigen Stromstärken als Ordinaten rechtwinklig auf OX in der Richtung OZ auf, so erhält man eine der Kurve ACB ähnliche, der Form einer Sinusoide entsprechende Kurve, die den Verlauf eines Induktionsstromes veranschaulicht. Die von der Kurve ACB und der Abscissenlinie OX eingeschlossene Fläche entspricht der während des ganzen Zeitverlaufs durch den sekundären Stromkreis gegangenen Elektrizitätsmenge Q, die bekanntlich durch It ausgedrückt wird, wobei I hier einen Mittelwert

der verschiedenen Stromstärken bezeichnet, die im Verlaufe der sehr kurzen Zeit t dem Induktionsstrome zukommen. Diesen Mittelwert bestimmt man, wenn man über der Basis AC der Kurve ACB ein Rechteck von gleicher Fläche

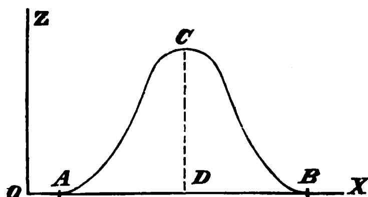


Fig. 21.

zur Kurvenfläche konstruiert. Die Höhe dieses Rechteckes entspricht alsdann der gesuchten mittleren Stromstärke.

53. **Apparate zur Erzeugung und Benutzung der elektrischen Induktion.** — Diese Induktionsapparate sind: die Induktionsrollen, sowie die später zu betrachtenden Induktionsmaschinen. Die Induktionsrollen werden durch einen elektrischen Strom betrieben, während die genannten Maschinen zu ihrem Betriebe mechanische Kraft erfordern, jedoch kann man mit den durch dieselben erzeugten starken elektrischen Strömen auch wiederum solche Maschinen betreiben und als mechanische Motoren benutzen.

Eine Induktionsrolle besteht im wesentlichen aus zwei konzentrisch auf eine cylindrische Spule gewickelten, von einander isolierten Drahtspiralen oder Rollen, von denen die eine, gewöhnlich die innere, den induzierenden (erregenden) oder primären Strom, die andere den induzierten oder sekundären Strom leitet und also in den entsprechenden Stromkreis eingeschaltet ist. Um mittels eines gleichmäßig fließenden Batteriestromes die zur Hervorrufung der Induktionsströme nötigen Wechsel hervorzurufen, benutzt man das sogen. Rheotom oder den Wagnerschen Hammer, dessen Prinzip Fig. 22 S. 100 illustriert.

Ein solcher Apparat besteht im allgemeinen aus einem federnden Hebel oder einer leicht elastischen Blattfeder, die mit dem einen Ende mit dem Primärstromkreis verbunden ist, welcher in einem Teile seines Verlaufes eine um einen weichen Eisenkern gewundene Spirale S bildet; das freie Ende der Blattfeder ist mit einem den Magnetanker bildenden Eisenplättchen a verbunden, das an der Außenseite ein Platinplättchen trägt, welches gegen die Platinspitze einer Schraube federt und durch seinen Kontakt mit dieser den Stromkreis der galvanischen Batterie B schließt. Sobald aber dieser Kontakt hergestellt ist, wird der Eisenkern in der Spirale S magnetisch und zieht den Anker a an, wodurch der Batteriestromkreis unterbrochen und also der Eisenkern auch sofort wieder entmagnetisiert wird, so daß er den Anker a losläßt, der nun wieder durch seinen Kontakt den Stromkreis schließt, dadurch den Eisenkern wieder magnetisiert und so fort. Man kann auf diese Weise erreichen, daß sehr viele Stromwechsel in der Sekunde stattfinden und daher auch eine entsprechend rasche Aufeinanderfolge von Induktionsströmen entsteht, die sich insbesondere zu physiologischen Wirkungen, sowie Funkenerscheinungen 2c. benutzen läßt.

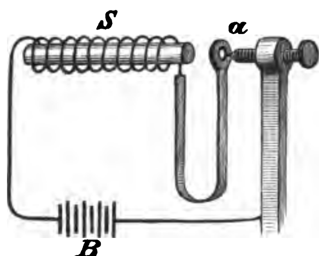


Fig. 22.

Zu starken Funkenbildungen benutzt man den sogenannten Funkeninduktor oder Ruhmkorffschen Induktor. Bei diesem in Fig. 23 dargestellten Apparat besteht die Sekundärspule aus einem sehr langen, dünnen, vielfach neben- und übereinandergewickelten Draht von großem elektrischen Widerstande, wogegen die Primärspule aus einem dicken Drahte von viel geringerer Länge, der viel weniger Windungen und entsprechend geringeren Widerstand bildet,

hergestellt ist. Der in der Induktionsspule befindliche Eisenkern ist aus einem Bündel von weichen ausgeglühten Eisendrähten gebildet. Der Apparat ist mit einem Rheotom und einer Vorrichtung zur Funkenbildung versehen. Bei den größeren Apparaten dieser Art ist der dicke Draht der Primärspule etwa 40 m lang, während der dünne Draht der Sekundärspule eine Länge von etwa 8000 bis 10 000 m hat. Mit einem Bunsen-Element giebt ein solcher Apparat Funken bis 82 mm Länge; mit sieben Bunsen-Elementen

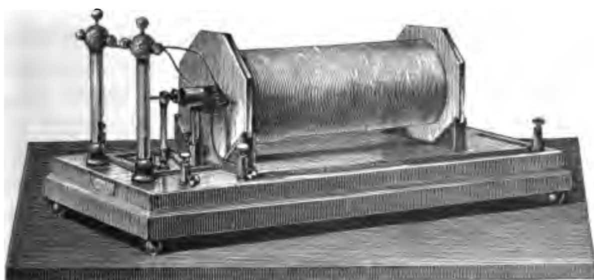


Fig. 23.

erhält man aber Funken bis zu 25 cm Länge. Bei einem von Ritchie konstruierten Induktor hat der Eisenkern 46 cm Länge bei 44 mm Durchmesser; der Primärdraht ist 46 m lang und 3.8 mm dick, mit Guttapercha überzogen und in drei Lagen aufgewickelt. Der Sekundärdraht ist in drei Abteilungen, die durch Guttaperchaoringe getrennt sind, aufgewickelt; die Dicke dieses Drahtes beträgt 0.20 mm und seine Gesamtlänge 14660 m. Mit fünf Bunsen-Elementen giebt der Apparat Funken bis zu 30 cm Länge.

Dreizehntes Kapitel.

Gleichstrom und Wechselstrom.

54. Der Gleichstrom. — Die auf irgendwelche Weise erzeugte elektrische Energie ruft einen Druck oder eine Spannung hervor, die innerhalb der elektrisch erregten Körper in Schwingungen sich bethätigt. Hierbei wird ein Widerstand überwunden und demzufolge eine molekulare Arbeit geleistet, die als Wärme, Licht, Magnetismus oder als chemische Wirkung sich äußern kann. Die somit hervortretende Kraftleistung wird elektromotorische Kraft genannt. Nach der gewöhnlichen Ansicht ruft diese elektromotorische Kraft den gegen den Widerstand des Leitungsmaterials arbeitenden Strom hervor. Naturgemäßer ist es aber, die elektromotorische Kraft als eine Arbeitsleistung zu betrachten, welche durch einen Druck, der als elektrischer Strom bezeichnet wird, auf einem gewissen Wege einen jenem Drucke entsprechenden Widerstand überwindet.

Die gegenseitigen Beziehungen der drei Größen: elektromotorische Kraft E, elektrischer Strom I und Widerstand R werden jedoch nach der üblichen Anschauungsweise und mit Rücksicht auf das Ohmsche Gesetz in die folgenden Beziehungen gebracht:

$$E = I\,R$$

$$I = \frac{E}{R} \text{ und } R = \frac{E}{I}.$$

Es ist hierbei jedoch zu berücksichtigen, daß Ohm ursprünglich mit dem elektrischen Widerstande den Begriff eines vom elektrischen Strome zurückgelegten Weges verbunden hat*).

Arbeitet die elektromotorische Kraft dauernd nach einer Richtung, so wird der mit ihrer Wirkung verbunden gedachte Strom als Gleichstrom oder als kontinuierlicher

*) Man vergleiche Einleitung S. 10.

Strom bezeichnet. Bei alledem ist ein solcher Strom als eine oscillierende oder schwingende Bewegung zu denken, etwa wie die in Schwingungen versetzte Luftsäule in einer tönenden Orgelpfeife. Unter Umständen können die Schwingungen des Gleichstromes durch die Schwankungen des Lichtes elektrischer Lampen sehr bemerklich werden.

Insofern man die Entstehung des elektrischen Stromes einer Rotation der kleinsten Massenteilchen des Leitungsdrahtes zuschreibt, hat man anzunehmen, daß bei einem Gleichstrom diese Rotation infolge des stets nach einerlei Richtung pulsierend fortwirkenden Antriebes der elektromotorischen Kraft ebenfalls immer nach einer Richtung erfolge, wobei jedoch mehr oder minder Geschwindigkeitsschwankungen stattfinden, so daß bei jeder Umdrehung eines so erregten Massenteilchens eine Art Wellenbewegung zustandekommt, die in der Form einer Sinusoide ähnlich

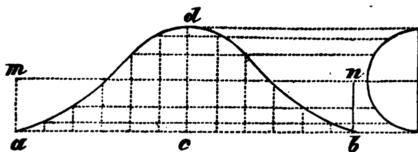


Fig. 24.

wie in Fig. 24 dargestellt werden kann. Die Aufzeichnung dieser Kurve erfolgt so, daß man den Umfang eines angenommenen Kreises in einer geraden Linie a b als Basis der Kurve aufträgt und ebenso wie den Kreisumfang in eine beliebige Anzahl gleicher Teile einteilt, wie dies für einen Halbkreis neben der Kurve geschehen ist. In diesem Halbkreis zieht man für jeden Teilpunkt in dem Sinus für den Halbmesser Eins entsprechende Vertikale und diese Vertikallinien ergeben die Ordinaten der die Stromwelle graphisch versinnbildlichenden Sinusoide, wobei man aber — wie schon erwähnt wurde — die Schwingungen ähnlich

wie die Schwingungen einer in einem Rohre eingeschlossenen und in geeigneter Weise erregten Luftsäule sich zu denken hat.

Die Basis a b der Kurve entspricht einer Wellenlänge oder der Schwingungsamplitude, welche im Zeitverlaufe einer Umdrehung von der Schwingungsbewegung zurückgelegt wird. Die mittelste und größte Ordinate c d der Kurve entspricht der Maximalstärke des Druckes oder Stromes, das heißt der Stelle der stärksten molekularen Verdichtung. Die Länge einer solchen Schwingung findet in Wirklichkeit nur innerhalb der Grenzen der molekularen Bewegung statt und ist demzufolge unmeßbar klein, indem sie etwa innerhalb der Grenzen der Lichtwellenlänge liegt, so daß diese Schwingungen etwa nur in der abwechselnden Ausdehnung und Zusammenziehung eines Moleküls des Leitungsdrahtes bestehen. Die Wirkungen dieser Schwingungen werden in der allmählich zunehmenden Sprödigkeit des Leitungsdrahtes bemerklich.

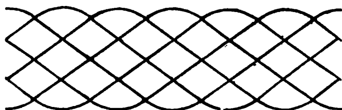
Die Fläche der in Fig. 24 abgebildeten Stromkurve entspricht der Größe der den Strom hervorrufenden elektromotorischen Kraft. Errichtet man über der Basis a b mit einer dem Halbmesser des entsprechenden Kreises gleichen Höhe a m ein Rechteck a b m n, so entspricht dessen Höhe der mittleren Stromstärke und dessen Fläche der Kurvenfläche und also auch der Größe der bezüglichen elektromotorischen Kraft. Ist also I_m die mittlere Stromstärke und R gleich der Wellenlänge, so gilt für die vom Strome geleistete Arbeit die Gleichung der elektromotorischen Kraft

$$1)\quad E = I_m R.$$

Werden in sehr kurzen Zeitverläufen viele solche Stromwellen nach einander in einer gleichen Richtung in eine Stromleitung gesendet, so wird die oscillatorische Wirkungsweise des elektrischen Stromes um so weniger hervortreten, je mehr Stromwellen in demselben Zeitteilchen auf einander folgen, indem alsdann die auf einander folgenden Wellenbogen einander mehr und mehr decken und nur die Gipfel kleine

Wellenberge bilden, wie dies Fig. 25 veranschaulicht. Die oscillatorische Bewegung des Stromes verschwindet dann für die Wahrnehmung gänzlich und es ist ein wirklicher Gleichstrom vorhanden.

Die elektrische Arbeit ist bestimmt durch das Produkt aus Potentialdifferenz oder elektromotorischer Kraft in die Stromstärke in Analogie zur Bestimmung der Dampfarbeit pro Kolbenschub in einem Dampfcylinder, welche gegeben ist durch das Produkt aus Dampfdruck auf die Kolbenfläche in die Kolbengeschwindigkeit.


Fig. 25.

Der Druck ist hierbei nach der kinetischen Atomtheorie als eine Molekulararbeit in der Fläche oder als Flächendruck zu denken. Es gilt also für die elektrische Arbeit die Formel

$$A = E\,I = I^2\,R.$$

55. **Der Wechselstrom.** — Ein Wechselstrom entsteht dadurch, daß jede Stromwelle am Ende ihres Weges oder ihrer Amplitude sofort wieder in die entgegengesetzte Richtung umschlägt, so daß eine hin- und hergehende pendelartige Bewegung entsteht, indem eine fortwährend hin- und hergehende Drehung stattfindet. Die Art dieser Schwingung ist ähnlich wie bei dem Gleichstrom durch eine Sinusoide darstellbar, jedoch treten unter Umständen auch verzerrte Kurven ein. Für gewöhnlich wird aber die Wechselstromwelle durch eine regelrechte Sinusoide dargestellt, wobei man aber die Wellenbewegung nach abwechselnden Richtungen ähnlich wie bei dem Pendelschlag sich zu denken hat.

Mit Bezug hierauf stellt man die Wechselstromwelle als eine halb über halb unter der horizontalen Abscissenachse befindliche Doppelsinusoide dar und bezeichnet die obere Kurve als eine positive und die untere Kurve als die negative Stromwelle; diese gebräuchliche graphische Darstellung der

Wechselstromwelle zeigt Fig. 26. Man denkt sich dabei jeden der beiden Teile dieser Doppelwelle durch eine halbe Umdrehung gebildet.

Bezeichnet man mit E_t die in einem beliebigen Zeitpunkte t der Wellenbewegung wirksam gedachte elektromotorische Kraft und mit I_t die in demselben Zeitpunkte vorhandene Stromstärke, mit E_{max} die maximal elektromotorische Kraft, das ist eine durch die Summierung einer größeren Anzahl von Impulsen aufgesammelte elektromotorische Kraft, und mit R den sogenannten Ohmschen Widerstand des ganzen Stromkreises, so setzt man zur Bestimmung der im Zeitpunkte t wirksamen elektromotorischen Kraft die Gleichung

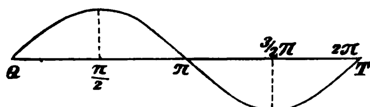


Fig. 26.

$$2)\quad E_t = E_{max} \sin 2\pi \frac{t}{T},$$

wobei t den vom Beginn des Cyklus, das heißt vom Zeitpunkte, wo die elektromotorische Kraft gleich Null ist, gezählten Zeitverbrauch bezeichnet. Nach dem Ohmschen Gesetz gilt dann für die Stromstärke in diesem Zeitpunkte die Gleichung

$$3)\quad I_t = \frac{E_{max}}{R} \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

Setzt man $\frac{2\pi}{T} = \omega$, so ist für diese Gleichung einfacher zu setzen

$$4)\quad E_t = E_{max} \sin \omega t.$$

Für die von einem Wechselstrome I_t im Zeitpunkte t geleistete Gesamtarbeit ergiebt sich aus der durch Anwendung des Ohmschen Gesetzes aufgestellten Gleichung (3) die Formel

$$A = E_t\, I_t = \frac{E^2_{max}}{R} \sin^2 2\pi \frac{t}{T}.$$

Vierter Abschnitt.

Magnetismus und Elektromagnetismus.

Vierzehntes Kapitel.

Die Natur des Magnetismus.

56. Der Magnetismus im allgemeinen und der Erdmagnetismus im besondern. — Magnetismus ist eine durch Anziehung und Abstoßung wirksame, gewissen Körpern von Natur aus innewohnende oder ihnen durch bereits mit dieser Kraft begabte Körper mitteilbare Kraft. Naturgemäß kommt der Magnetismus dem Meteoreisen und gewissen Eisenerzen zu, die deshalb als Magneteisen bezeichnet werden. Dem Magnetismus zugänglich ist das Eisen im allgemeinen, sowie Nickel und Chrom. In geringerem Grade wirkt der Magnetismus auch auf andere Körper ein. Alle vom Magnet angezogenen Körper werden als ferromagnetische, paramagnetische oder kurzweg als magnetische Körper bezeichnet. Auf gewisse Körper dagegen wirkt der Magnet nur abstoßend; dies gilt insbesondere für das Wismut. Derartige Körper werden als diamagnetische bezeichnet. Festgehalten wird der einmal mitgeteilte Magnetismus aber nur vom gehärteten Stahl. Gegenüber der magnetischen Erdkraft äußert sich der Magnetismus magnetisierter Körper durch doppelte Polarität, die als

Nord- und Südpol unterschieden wird, wobei man das nach dem irdischen Nordpol sich richtende Ende eines frei beweglichen stabförmigen Magnets als Nordpol und das andere Ende als Südpol bezeichnet. Wird aber diesem frei beweglichen Magnet, insbesondere einer Magnetnadel, ein anderer Magnet genähert, so ist derjenige von dessen Polen, gegen den sich der Nordpol der Magnetnadel richtet, als Südpol, und also der Pol, gegen den sich der Südpol der Magnetnadel richtet, als Nordpol bezeichnet.

Die wesentlichen Eigenschaften des Magnetismus sind kurz folgende:

Die magnetische Kraft wirkt hauptsächlich durch das Medium Eisen und Stahl; sie wirkt durch neutrale Körper, d. h. solche Körper, die nicht selbst magnetisch werden können, ungestört hindurch; die Stärke der magnetischen Kraft steht im umgekehrten Verhältnis zum Quadrate der Entfernung je nach dem Gegenüberstehen ungleicher oder gleicher Polaritäten durch Anziehung, beziehungsweise Abstoßung; durch Erwärmung wird die magnetische Kraft geschwächt und durch genügend hohe Temperatur gänzlich aufgehoben; weiches Eisen ist nur so lange magnetisch, als es der Einwirkung einer äußeren magnetisierenden Kraft unterliegt; gehärteter Stahl bleibt permanent magnetisch nach erfolgter Magnetisierung; jedes Teilchen eines Magnets bildet für sich einen zweipoligen Magnet; ein einpoliger Magnet ist unmöglich, wohl aber kann ein stabförmiger Magnet eine abwechselnde Reihe von Folgepolen in seiner Länge besitzen; wenn zwei einander anziehende, also entgegengesetzt wirkende Magnetpole gleiche Intensität besitzen, so heben dieselben bei der Annäherung ihre Kraft gegenseitig auf und es entsteht magnetisches Gleichgewicht.

57. **Der Erdmagnetismus.** — Die Erde ist als ein Magnet von veränderlicher Polarität zu betrachten. Einige dieser Veränderungen treten regelmäßig periodisch auf, andere sind dagegen als ausnahmsweise Störungen zu betrachten

und werden, wenn sie sich besonders heftig äußern, als magnetische Gewitter bezeichnet.

Die periodischen Änderungen des Erdmagnetismus lassen sich als tägliche, monatliche, jährliche und säkulare Variationen unterscheiden. Die Ursachen dieser Änderungen sind nur teilweise bekannt. Durch langjährig regelmäßig ausgeführte magnetographische Beobachtungen hat man zumteil die wirklichen Ursachen der Abhängigkeit der verschiedenen magnetischen, elektrischen, meteorologischen und atmosphärischen Erscheinungen ergründet.

Infolge der natürlichen Verteilung der magnetischen Erdkraft, oder — wie man auch sagen kann — infolge der Ungleichmäßigkeit des Magnetfeldes der Erde zeigt die Magnetnadel Abweichungen von der wahren Nordsüdlinie und im allgemeinen stimmt der magnetische Nord- und Südpol nicht mit dem geographischen Nord- und Südpol überein.

Der Winkel, welchen der durch die horizontal balancierte Magnetnadel bestimmte magnetische Meridian mit dem astronomisch bestimmten geographischen Meridian eines Ortes einschließt, wird die Deklination genannt. Eine um eine horizontale Achse vertikal bewegliche Magnetnadel, die sich in der Richtung der magnetischen Erdachse einstellt, bestimmt für die verschiedenen Punkte der Erdoberfläche die Inklination.

Deklination und Inklination sind in dem oben bezeichneten Sinne veränderlich.

Zur Bestimmung der magnetischen Erdkraft an einem Orte muß außer der Deklination und Inklination auch noch die magnetische Intensität bekannt sein. Die Richtung dieser Intensität fällt mit der Richtung der Kraftlinien des irdischen Magnetfeldes zusammen und wird durch die Inklination bestimmt.

58. Die magnetischen Kraftlinien. — Um die Magnetpole herum wird ein von der magnetischen Kraft beherrschtes

Magnetfeld gebildet, welches sich als ein von magnetischen Kraftlinien erfüllter Raum darstellt. Die Richtung dieser Kraftlinien ist mittels einer durch das magnetische Feld geführten Magnetnadel oder mittels der magnetischen Eisenstaubbilder nachweisbar.

Fig. 27 zeigt die von einem Magnetpol ausgehenden und das magnetische Feld dieses Poles bildenden Kraftlinien, die sich in der bekannten Weise durch Aufstreuen

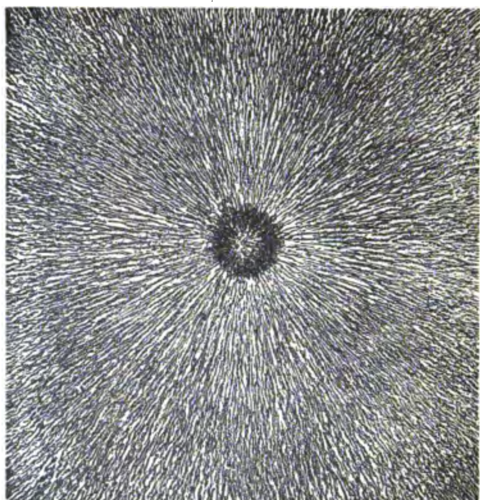


Fig. 27.

feiner Eisenfeilspäne auf ein auf den Magnetpol horizontal aufgelegtes Papierblatt oder auf eine dünne Glasplatte darstellen lassen.

Bei dem Magnetstabe (Fig. 28) zeigen die das magnetische Feld bildenden Kraftlinien (Linien der magnetischen Induktion) im allgemeinen das Streben, von einem Pol

nach dem andern sich zu krümmen und somit sich möglichst zu verkürzen; in der Mitte des Magnetstabes entsteht eine neutrale Zone, wo die Linien entgegengesetzter Polarität sich neutralisieren.

Bei einem Magnet, dessen Pole gegen einander gekehrt sind, ist in der Mitte zwischen den beiden entgegengesetzten Polen eine neutrale Zone.

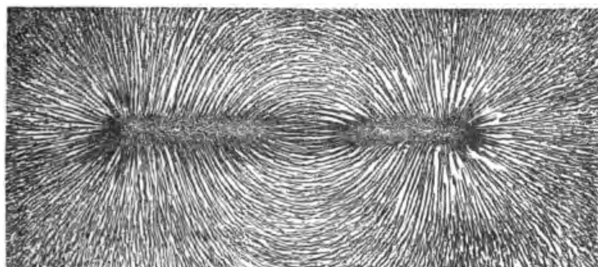


Fig. 28.

Während die zwischen zwei ungleichen Polen gebildeten Kraftlinien gegen einander streben und sich zu vereinigen suchen, stoßen sich die zwischen zwei gleichen Polen gebildeten Kraftlinien ab, indem sie sich nach entgegengesetzten Richtungen krümmen.

Bestimmt man in einem Magnetfelde (etwa durch Beobachtung der Schwingungen einer Magnetnadel) die Punkte gleicher Kraft oder Intensität, und verbindet dieselben durch Kurven, so erhält man sogenannte Potentialkurven, die als die Durchschnitte von geschlossenen Potentialflächen mit der Ebene der Kraftlinienzeichnung aufzufassen sind, indem in Wirklichkeit die Kraftlinien sich räumlich nach allen Seiten hin ausbreiten. Diese, die Kraftlinien zweier entgegengesetzter Pole normal durchschneidenden Potentialkurven sind in Fig. 29 S. 112 dargestellt.

Trägt man normal zur Achse eines Magnetstabes die etwa mittels Schwingungen einer Magnetnadel gemessene

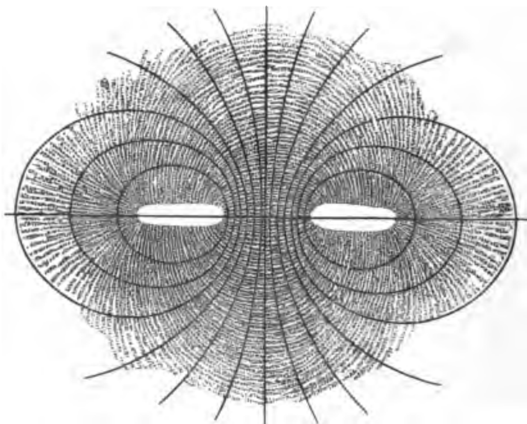


Fig. 29.

magnetische Kraft nach einer beliebigen Maßeinheit in proportionalen Ordinaten auf, so erhält man die in Fig. 30 dargestellten Kurven, welche die Zunahme des Magnetismus von der neutralen Mitte aus darstellen. Übrigens ist zu bemerken, daß dieses Maximum der magnetischen Kraft, das ist die stärkste Polarität, in etwas geringerer Entfernung von der Stabmitte liegt, als die Entfernung der Stabenden.

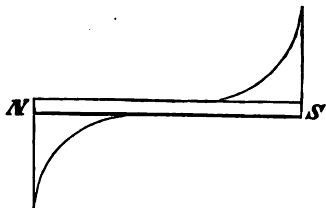


Fig. 30.

59. **Die magnetische Polstärke.** — Die im magnetischen Kraftfelde je nach Umständen sich äußernde Anziehungs- oder Abstoßungskraft wird nach der Coulombschen Formel (S. 29) bestimmt, indem man setzt

$$m = d\sqrt{F}$$

und m als die Polstärke bezeichnet.

Die Dimensionen der Polstärke sind

$$M^{\frac{1}{2}}\,L^{\frac{3}{2}}\,T^{-1}$$

und die Einheit der Polstärke nach dem C. G. S.-System ist diejenige Polstärke, durch welche ein ähnlicher in der Entfernung von 1 cm befindlicher Pol mit einer Kraft von 1 Dyn abgestoßen wird.

60. **Das magnetische Moment.** — Diese in der elektrischen Meßkunst bei der Bestimmung der Oscillationsenergie einer Magnetnadel benutzte Größe ist gegeben durch das Produkt aus der Polstärke m eines Magnetstabes und der zwischen seinen Polen gemessenen Länge desselben. Die Dimensionen des magnetischen Momentes sind

$$M^{\frac{1}{2}}\,L^{\frac{5}{2}}\,T^{-1}.$$

Die Einheit des magnetischen Momentes nach dem C. G. S.-System ist das Moment eines Magnetstabes, dessen Polstärke gleich der C. G. S.-Einheit und dessen Poldistanz gleich 1 cm ist.

61. **Die Magnetisierungsstärke.** — Bezüglich eines Magnetstabes oder Magnets im allgemeinen wird diese Größe bestimmt durch den Quotienten aus dem magnetischen Moment dividiert durch das Volumen des Magnets. Die Dimensionen der Magnetisierungsstärke sind

$$M^{\frac{1}{2}}\,L^{-\frac{1}{2}}\,T^{-1}.$$

Bezeichnet man mit J die Magnetisierungsstärke, mit m die Polstärke, mit l die Länge eines Magnetstabes zwischen

den Polen (etwa $^5/_6$ der Gesamtlänge) und mit S den Stabquerschnitt, so ist

$$J = \frac{m\,l}{S\,l} = \frac{m}{S} \text{ und folglich } m = J\,S.$$

Fünfzehntes Kapitel.

Elektromagnetismus.

62. Elektromagnete. — Ein Elektromagnet besteht im allgemeinen aus einem mit isoliertem Kupferdraht umwickelten Eisenkörper, der infolge eines durch die Drahtbewickelung gesendeten elektrischen Stromes zu magnetischer Wirkung erregt wird. Die gewöhnliche Form der in der Elektrotechnik benutzten Elektromagnete ist die sogenannte Hufeisenform, wobei der Magnet zwei parallel gerichtete Schenkel bildet, die mit der Bewickelung aus isoliertem Kupferdrahte versehen sind. Um die durch den elektrischen Strom gebildeten Pole eines Elektromagnets, das ist die Richtung der Magnetisierung zu bestimmen, hat man die Ampèresche Regel (S. 93) oder die Maxwellsche Regel (S. 91) in Anwendung zu bringen. Am leichtesten gewinnt man darüber ein Urteil, wenn man sich in der Umwindung des Bewickelungsdrahtes einen Beobachter so liegend denkt, daß der elektrische Strom an dessen Füßen eintritt und an dessen Kopfe austritt, während das Gesicht nach der magnetischen Achse gerichtet ist. Hat dieser Beobachter beide Arme rechtwinkelig zu seinem Körper ausgestrahlt, so weist die linke Hand nach dem Nordpol und die rechte Hand nach dem Südpol.

63. Verschiedene Formen von Elektromagneten. — Die Figuren 31 bis 41 stellen verschiedene Formen von kleineren Elektromagneten dar, wie solche für elektromagnetische Apparate, wie Telegraphen, Klingeln und Meßinstrumente, benutzt werden.

Fig. 31 zeigt einen aus drei Stücken hergestellten Elektromagnet, welche Form anstatt des gebogenen Hufeisenmagnets besonders bei telegraphischen Apparaten ꝛc. vorkommt. Es sind hierbei zwei gerade cylindrische Eisenkerne A und B durch ein flaches viereckiges Querstück mittels Schrauben verbunden (in der Abbildung ist dieses Querstück getrennt dargestellt). Infolge der Bewickelungsrichtung und der Stromzuführung, deren Richtung die Pfeile andeuten, werden die Schenkel derartig erregt, daß im Schenkel A der negative oder Südpol und im Schenkel B der positive oder Nordpol erregt wird.

Fig. 32 stellt einen hufeisenförmigen, aus einem Stück weichen Rundeisens gebogenen Elektromagnet dar.

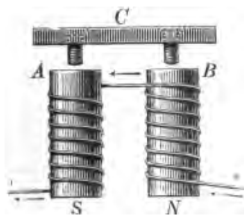
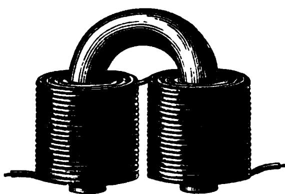


Fig. 31.


Fig. 32.

Bonellis Elektromagnet (Fig. 33 S. 116) besteht aus einer hölzernen, mit Draht umwundenen Spule, in welche der eiserne cylindrische Kern A so hineingesteckt ist, daß derselbe mit dem zur Wirkung bestimmten Ende sich noch um eine gewisse Distanz innerhalb der Spule befindet und demnach die von diesem Pole angezogene Armatur B in die Spule hineintreten muß. Durch diese Anordnung wird eine kräftigere Anordnung zwischen beiden Teilen herbeigeführt.

Maronis Elektromagnet (Fig. 34), welcher für das italienische Morse-Instrument adoptiert worden ist, besteht aus einem durch die Drahtspule gesteckten dünnen Eisenstabe,

an dessen Enden kurze starke cylindrische Armaturstücke angeschraubt sind, welche als Magnetpole dienen.



Fig. 33.



Fig. 34.

Clarkes Elektromagnet (Fig. 35) hat in der Anordnung seiner Kerne die für magnetelektrische Instrumente gewöhnliche Form, ist aber in eigentümlicher Weise mit Draht umwunden, indem die Drahtrollen nach beiden Enden

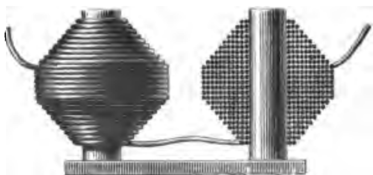


Fig. 35.

der Kerne konisch verlaufen und in der Mitte den größten Durchmesser haben. Es wird dadurch für besondere Zwecke in der Mitte der Kerne eine stärkere Induktionswirkung erreicht, als an den Enden.

Die gewöhnliche Form des für magnetelektrische Instrumente gebräuchlichen Elektromagnets ist in Fig. 36

illustriert, wobei die Kerne massiv oder auch hohl, d. i. röhrenförmig, sein können.

Ein Elektromagnet mit nur einer Drahtrolle ist in Fig. 37 illustriert; bei demselben ist der drahtlose Schenkel, welcher durch die Drahtrolle des andern Schenkels mit



Fig. 36.



Fig. 37.

magnetisiert wird, so gebogen, daß die beiden Pole sehr nahe zusammen kommen und daher auf einen Anker (Armatur) von geringem Umfange wirken können.



Fig. 38.

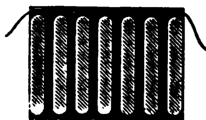


Fig. 39.

Ein Elektromagnet mit zwei konzentrischen Polen ist in Fig. 38 dargestellt. Bei demselben ist der eine Magnetschenkel wie gewöhnlich solid cylindrisch geformt,

während der andere Schenkel aus einem den ersten Schenkel umgebenden Hohlcylinder besteht. Die induzierende Drahtrolle sitzt auf dem inneren, soliden Schenkel und wird von dem hohlcylindrischen Schenkel umgeben; während also der eine Pol durch eine Kreisfläche gebildet wird, besteht der andere Pol aus einer Ringfläche. Dieser sogenannte Glockenmagnet soll verhältnismäßig sehr kräftig wirken.

Magnete ähnlicher Art werden zuweilen für Telephone benutzt.

Pulvermachers Elektromagnet (Fig. 39) ist in der Weise hergestellt, daß in eine Eisenplatte eine Reihe von Nuten oder Furchen eingeschnitten sind, in welche ein isolierter Draht schlangenförmig eingelegt ist. Dergleichen


Fig. 40.

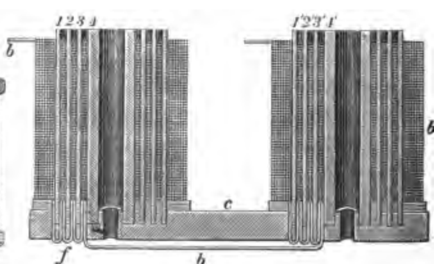


Fig. 41.

Magnete haben so viele Pole, als durch die Einschnitte Vorsprünge in der Platte gebildet worden sind, und zwar wechseln die Pole mit einander ab. Mit nur einem Drahte werden diese Magnete nicht sehr kräftig, da sie aber nur wenig Raum einnehmen, so kann man die Pole sehr vervielfältigen.

Roccis Elektromagnet (Fig. 40) besitzt die Eigentümlichkeit, daß der Magnet gleichzeitig als Stromleiter oder Konduktor dient. Um dies zu bewerkstelligen ist um einen steifen Eisendraht ein langer Streifen Eisenblech mehrmals herumgewunden, und um dessen Windungen von

einander zu isolieren ist ein Streifen geöltes Papier dazwischengelegt. Ein Pol der erregenden Batterie ist mit dem in der Mitte steckenden Eisendrahte und der andere Pol mit dem äußern Ende des Blechstreifens verbunden. Jede Umwindung dieses vom elektrischen Strome durchlaufenen Blechstreifens induziert in der nächsten Windung den Magnetismus und dieser übt wiederum seinen Einfluß auf die nächste Windung aus u. s. f. Die magnetische Kraft wächst nach der Mitte zu und die stärkste Wirkung leistet der Zentraldraht.

Wird isolierter Kupferdraht um den Roccischen Elektromagnet herumgewunden und der Strom hindurchgeführt, so wird das zusammengerollte Eisenblech und der Zentraldraht zwar auch magnetisch, aber der Magnetismus nimmt nach der Mitte zu ab. Wenn der elektrische Strom sowohl durch den außen herumgewundenen Kupferdraht als auch durch das zusammengewundene Eisenblech geleitet wird, so ist die magnetische Kraft im ganzen Apparat gleich stark.

In Comachos Elektromagnet (Fig. 41) besteht jeder Kern oder Magnetschenkel aus einer Reihenfolge konzentrischer Eisenröhren 1, 2, 3, 4 und 1′, 2′, 3′, 4′, welche einen ihrer Metalldicke gleichen Zwischenram zwischen sich haben. Auf jede dieser Röhren ist, immer in gleicher Richtung, ein isolierter Kupferdraht b gewickelt; die Umwicklung der beiden äußeren Röhren ist am stärksten. Die Enden f der den einzelnen Röhren entsprechenden Drähte gehen durch den Steg oder die Brücke des Magnets hindurch und sind derartig mit einander vereinigt, daß sie eine einzige Leitung bilden. Bei Anwendung von zehn Bunsen-Elementen ist die Anziehungskraft eines solchen Magnets mit 15 cm Spulendurchmesser und 17 cm Spulenlänge auf die Entfernung von 1 mm gleich 1000 kg und bei einer Entfernung von 6 mm gleich 250 kg. Man kann annehmen, daß ein solcher Comachoscher Röhrenmagnet bei gleichem Gewichte fünfmal stärker ist, als ein gewöhnlicher Elektromagnet.

64. Tragkraft der Magnete. — Die Tragkraft eines aus gutem und entsprechend gehärtetem Stahl hergestellten und mittels eines durch eine Drahtbewickelung geführten elektrischen Stromes bleibend magnetisierten, das ist mit dem Maximum des remanenten Magnetismus versehenen permanenten Magnets beträgt per Quadratcentimeter Querschnitt im Maximum etwa 4 Kilogramm. Bezüglich der Elektromagnete ist die Tragkraft eines Teils von der Größe des Eisenquerschnitts bestimmt, indem das Eisen immer nur bis zu seiner magnetischen Sättigung magnetisierbar ist; anderenteils wird aber auch die Tragkraft durch das Produkt aus der Zahl der Drahtwindungen, der Schenkelbewickelung und der erregenden Stromstärke bestimmt.

65. Die Ampèrewindungszahl. — Mit diesem in der Elektrotechnik allgemein üblichen Ausdruck bezeichnet man das für die Magnetisierung der Elektromagnete maßgebende Produkt aus der Gesamtzahl der auf einem Elektromagneten angebrachten Drahtwindungen und der durch diese Drahtwindungen gesendeten Stromstärke nach der dafür eingeführten Maßeinheit in Ampères. Bezeichnet man mit N die Zahl der sämtlichen Drahtwindungen, von denen jede einen den Elektromagnet umgebenden Ring bildet, und bezeichnet man ferner die Stärke des elektrischen Magnetisierungsstromes in Ampères mit I, so ist das Produkt NI die sogen. Ampèrewindungszahl, von welcher die Stärke der Magnetisierung abhängig ist, vorausgesetzt, daß das Eisen des Elektromagnets den entsprechenden Querschnitt hat. Man kann also die Windungszahl und die Stromstärke umgekehrt proportional zu einander beliebig ändern; solange das Produkt NI, das ist die Ampèrewindungszahl dieselbe bleibt, erhält man auch dieselbe Stärke der Magnetisierung. Da zum Beispiel für den Betrieb der Telegraphen nur ein sehr schwacher Strom (etwa 5 Milli-Ampère) zur Anwendung kommt, so müssen die betreffenden Elektromagnete, um die nötige Stärke zu erhalten, mit sehr vielen Windungen dünnen Drahtes versehen werden.

66. Regeln für die Bewickelung der Elektromagnete. — Der Durchgang des Stromes durch den Bewickelungsdraht eines Elektromagnets erzeugt darin eine Energie, die sich in Wärmeentwickelung äußert. Nach der Jouleschen Regel ist diese Wärmeentwickelung und also auch die dadurch hervorgerufene Temperaturerhöhung des Bewickelungsdrahtes proportional dem Produkt aus der zweiten Potenz der Stromstärke I und dem elektrischen Widerstande des Drahtes und folglich proportional $I^2 R$ zu setzen. Die magnetische Erregung selbst ist nach dem vorigen Paragraphen proportional der Ampèrewindungszahl

$$A = N I.$$

Werden statt N-Windungen beispielsweise 2 N-Windungen auf den Elektromagnet gebracht, so ist die Stromstärke auf die Hälfte zu vermindern und also nur noch ein Strom von $\frac{1}{2}$ Ampères durch die Bewickelung zu senden. Demzufolge kann man für dieselbe magnetische Erregung die Zahl der Drahtwindungen der Bewickelung beliebig verändern, wenn die erregende Stromstärke umgekehrt proportional verändert wird. Hat der für die Stromstärke I berechnete Draht mit Rücksicht auf den elektrischen Widerstand R und die dadurch (nach der Jouleschen Formel $I^2 R$ oder dem sogen. Joule-Effekt) hervorgerufene Erwärmung zur Innehaltung einer gewissen Temperaturgrenze die Dicke δ und die Länge l, so kann der für die Stromstärken $\frac{I}{a}$ benutzte Draht (mit Berücksichtigung des Joule-Effektes) die Dicke $\frac{\delta}{\sqrt{a}}$ und die Länge $a\,l$ erhalten, woraus für die Länge $a\,l$ der in Temperaturerhöhung des Drahtes sich äußernde Energieverlust ergiebt

$$a^2 R \left(\frac{I}{a}\right)^2 = R I^2.$$

Der Energieverlust, der durch die Erwärmung des Drahtes herbeigeführt wird, ist also von der Dicke des

Drahtes unabhängig, wohl aber steht er im Verhältnis zum Gewicht des Drahtes der Magnetbewickelung. Mit Rücksicht darauf, daß die Isolation des Drahtes und somit der Betrieb der Apparate durch eine zu starke Erhitzung der Drahtbewickelung der Elektromagnete nicht leiden darf, ist eine gewisse Temperaturgrenze dieser Erwärmung dadurch innezuhalten, daß für eine genügende Wärmeausstrahlung gesorgt ist. Hierzu ist eine entsprechend große Abkühlungsfläche der Drahtbewickelung erforderlich. Man nimmt an, daß in dieser Hinsicht eine Temperaturdifferenz von 40 bis 50 Grad C. in Bezug auf die Temperatur der umgebenden Luft nicht zu überschreiten ist; nimmt man das Maximum der Lufttemperatur zu 20—25° an, so ergiebt sich daraus die Temperaturgrenze des Bewickelungsdrahtes, die je nach Umständen zu berücksichtigen ist, zwischen 60—75° C.

Bei großen Elektromagneten, wie sie für die Dynamomaschinen angewendet werden, pflegt man 10—12 cm^2 für ein in der Bewickelung zur Hervorbringung des Joule-Effektes aufgewendetes Watt (Volt-Ampère) anzunehmen.

Anderseits ist aber auch die Maximalstärke oder Dichte des durch den Draht gesendeten Stromes durch gewisse praktische Erwägungen in gewissen Grenzen zu halten. Für Elektromagnete soll die Stromdichte 2 Ampères pro Quadratmillimeter Querschnitt des Bewickelungsdrahtes nicht überschreiten.

Sechzehntes Kapitel.

Die magnetelektrische Induktion.

67. **Das magnetische Kraftfeld.** — Ein Magnet ruft in ähnlicher Weise wie ein elektrisierter Körper in dem ihn umgebenden Raume eine Erregung hervor, die sich aber nicht so allgemein äußert, wie die elektrische Erregung, sondern in leicht bemerkbarer charakteristischer Weise nur

wenige Substanzen, hauptsächlich aber das Eisen beeinflußt. Unter der Voraussetzung, daß ein kugelförmiges Eisenstück, welches sich allein im Raume befindet, plötzlich aus irgendwelcher Ursache magnetisch würde, tritt die Bildung des Magnetfeldes durch radial von jenem Kugelmagnet ausgehende Kraftlinien ein, wobei die magnetische Wirkung sich nach dem Gravitationsgesetze im Raume ausbreitet, indem die magnetische Energie der Kraftlinien umgekehrt proportional zur zweiten Potenz der Entfernung von der die Energie ausstrahlenden Oberfläche abnimmt. Für die den gedachten Kugelmagnet konzentrisch umgebenden Potentialflächen gilt alsdann auch das Gesetz, daß das Potential einfach umgekehrt proportional der Entfernung vom Ausgangsorte der magnetischen Erregung ist.

Die Intensität des magnetischen Feldes wird mit H bezeichnet; seine Dimensionen sind dieselben wie die der Magnetisierungsstärke **I** (S. 80), nämlich

$$M^{\frac{1}{2}}\,L^{-\frac{1}{2}}\,T^{-1}.$$

68. **Die magnetisierende Wirkung eines magnetischen Kraftfeldes.** — Wird ein magnetisierungsfähiger Körper in ein magnetisches Kraftfeld, das heißt in die Nähe eines genügend starken Magnets gebracht, so wird dieser Körper in gewisser Weise erregt. Diese Erregung wird als Magnetisierung oder als magnetische Induktion bezeichnet und der so erregte Magnetismus heißt induzierter Magnetismus.

Die magnetische Induktion vollzieht sich in der Richtung der sogen. magnetischen Kraftlinien (S. 109).

Das magnetische Feld wird als gleichmäßig bezeichnet, wenn die dasselbe bildenden gedachten Kraftlinien parallel und in gleicher Entfernung von einander anzunehmen sind. In Wirklichkeit sind jedoch nicht einzelne Kraftlinien vorhanden, sondern das magnetische Kraftfeld ist von einer Energie erfüllt, ähnlich wie der Raum um die Erde herum als von Schwerkraft oder Gravitationswirkung erfüllt zu denken ist. Die Stärke oder Dichte dieses Stromes regelt

sich nach der Coulombschen Formel (S. 29) und seine Maximalintensität befindet sich in den Polflächen.

Das durch einen Magnetpol hervorgebrachte Magnetfeld kann nur in großer Entfernung vom Pole und auch da nur innerhalb einer verhältnismäßig kleinen Fläche als gleichmäßig oder homogen betrachtet werden. In der Richtung des Kraftstromes gilt die Potentialfunktion, indem bezüglich der für eine Stelle des Feldes geltenden Arbeitsleistung die Kraft sich umgekehrt proportional zu dem vom Ursprunge der Kraft gemessenen Wege verhält.

Ist m die Polstärke, F die Kraft und H die Intensität des Magnetfeldes oder magnetische Feldstärke*), so gilt die Gleichung

$$H = \frac{F}{m}.$$

Hieraus folgen die Dimensionen der magnetischen Feldstärke

$$M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}$$

und die Feldstärke nach dem C. G. S.-System ist die Stärke eines Magnetfeldes, welches die Kraft von 1 Dyn auf einen in das Feld gebrachten Magnetpol von der C. G. S.-Einheit an der betreffenden Stelle des Feldes ausübt.

Bei einem nicht gleichförmigen Magnetfelde ändert sich natürlich die Feldstärke von einem Punkte des Feldes zum anderen und der Ausdruck für die Feldstärke gilt immer nur für eine verhältnismäßig sehr kleine Durchschnittsfläche des Kraftstromes.

69. Die Wirkung des Magnetfeldes auf einen elektrischen Stromkreis. — Wird ein Drahtring (Fig. 42) in der Richtung der von einem magnetischen Nordpole ausgehend gedachten Kraftlinien geführt, so wird durch diese Bewegung eine Arbeit geleistet, indem der Ring durch den immer kräftiger

---

*) Zum Unterschiede von der Magnetisierungsstärke J (S. 80) soll von nun an die magnetische Feldstärke, wie üblich, mit H bezeichnet werden.

werdenden magnetischen Kraftstrom auch entsprechend kräftiger induziert und von einem immer stärker werdenden elektrischen Strome durchlaufen wird. Für einen durch den Ring nach dem magnetischen Nordpole hinblickenden Beobachter hat in

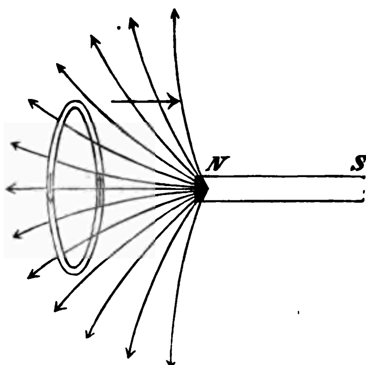


Fig. 42.

diesem Falle der den Drahtring durchlaufende elektrische Strom die Richtung der Uhrzeigerdrehung, das heißt der Strom läuft von links nach oben und von rechts nach unten. Man hat in diesem Falle anzunehmen, daß durch den Drahtring eine immer größer werdende Zahl magnetischer Kraftlinien hindurchgeht. Mit dem Begriffe der Kraftlinien hat man also in dieser Hinsicht nicht nur die Richtung der Kraft, sondern auch die Größe der Kraft zu verbinden.

70. **Das Induktionsgesetz.** — Für die im vorhergehenden geschilderte Wirkungsweise der elektromagnetischen Induktion hat Lenz 1834 das mit seinem Namen bezeichnete für die Induktion gültige Gesetz formuliert: — Für jede Veränderung des von einem Stromkreise umfaßten

Kraftflusses ist die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft, beziehungsweise des von dieser elektromotorischen Kraft erzeugten Stromes derartig, daß der Bewegung entgegengewirkt wird.

Ein elektrischer Strom, welcher sich in einem magnetischen Kraftfelde infolge der auf ihn einwirkenden elektromagnetischen Kräfte verschiebt, erzeugt eine Arbeit. Jeder arbeitende Strom erleidet aber eine Abschwächung. An der Stelle, wo die Arbeit abgegeben wird, stellt sich im Sinne der Stromrichtung ein Potentialabfall ein, welcher als elektromotorische Gegenkraft wirksam wird. Der numerische Wert dieses Potentialabfalles ist gleich der vom Strome in jeder Zeiteinheit für die Stromeinheit abgegebenen Arbeit. Wenn also die Kraftströmung des Magnetfeldes wächst, so wirkt der dadurch induzierte Strom diesem Wachstum entgegen und wenn die Kraftströmung des Magnetfeldes sich vermindert, so sucht der induzierte elektrische Strom das Magnetfeld zu verstärken. Die Richtung des induzierten Stromes ändert sich in dem Augenblick, wo die Kraftströmung des Feldes von einem Maximum zu einem Minimum übergeht.

71. **Die induzierte Elektrizitätsmenge.** — Wird ein Leiter periodisch in gleichen Zeitintervallen, also durch gleichförmige Umdrehung, durch ein konstantes magnetisches Feld bewegt, so wird in diesem Leiter bei jeder Umdrehung ein elektrischer Strom von der mittleren Stärke I_m erregt; ist die Zeit der Bewegungsperiode gleich t, so ist die in dieser Zeit erzeugte Elektrizitätsmenge

$$Q = I_m t.$$

Ist ferner der Ohmsche Widerstand des Leiters gleich R, seine Länge l, der zwischen den beiden Magnetpolen bei jeder Umdrehung quer durch die Kraftlinien durchlaufene

halbe Weg a und die mittlere Intensität des Feldes gleich H, so gilt die Gleichung

$$Q = \frac{H l a}{R}.$$

Nun ist aber l a die vom Leiter bei jeder Umdrehung durchlaufene Fläche S, somit ist HS = m, das ist gleich einer Polstärke oder gleich einem magnetischen Kraftstrom. Die Dimensionen dieser Elektrizitätsmenge sind demnach, wenn $R = \frac{L}{T}$ gesetzt wird,

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}.$$

Die induzierte elektromotorische Kraft ist nach dem Ohmschen Gesetz

$$E = IR = \frac{HS}{t}$$

und die Arbeit der Induktion

$$A = EIt = I^2 Rt = \frac{E^2}{R} t.$$

72. **Die Selbstinduktion.** — Unter Selbstinduktion versteht man eine in elektrischen Stromkreisen vorkommende Wirkung, die sich mit der Wirkungsweise eines sogenannten hydraulischen Buffers oder Windkessels vergleichen läßt. Ein solcher hydraulischer Buffer verhindert die augenblickliche Fortpflanzung des hydraulischen Druckes, indem er eine gewisse Energiemenge durch ein elastisches Luftpolster absorbiert und in der Folge, sobald der hydraulische Druck in der Leitung nachläßt, wieder abgiebt. Hierdurch werden in der hydraulischen Leitung entsprechende Stromverzögerungen hervorgerufen und es treten sogen. Phasenverschiebungen zwischen der motorischen Kraft und der die Leitung durchlaufenden Strömung ein. Ein ähnlicher Vorgang findet in elektrischen Stromkreisen statt, in denen durch Elektromagnete, sowie gelegentlich auch durch Kondensatoren Kapazitäten

eingeschaltet sind, die zu ihrer Ladung eine gewisse Zeit erfordern. Die dadurch sich bemerkbar machende Verzögerung im Eintritt des Strommaximums, sowie bei plötzlichem Nachlassen des Leitungsstromes durch das Eintreten eines Rückstromes, wird als Selbstinduktion bezeichnet.

Die Wirkung der Selbstinduktion wird in den aus dem Ohmschen Gesetz abgeleiteten Formeln durch die Einführung des Koeffizienten der Selbstinduktion zum Ausdruck gebracht. Da der Selbstinduktion die Dimension einer Länge, das ist einer negativen Kapazität zukommt, so wird dieser Koeffizient durch L bezeichnet. Es wird dabei angenommen, daß in dem betreffenden Falle der von der Elektrizitätsquelle ausgesendeten elektromotorischen Kraft eine elektromotorische Kraft der Selbstinduktion entgegenwirkt.

Bezeichnet man für einen verschwindend kleinen Zeitverlauf dt die Stromstärke mit Bezug auf die kleine entsprechende Änderung derselben mit dI_t, so gilt für die elektromotorische Gegenkraft der Selbstinduktion unter Benutzung des erwähnten Koeffizienten L die Formel

$$-L = \frac{dI_t}{dt}$$

und daher wird im Zeitpunkte t die Stromstärke nicht mehr einfach durch das Ohmsche Gesetz bestimmt, sondern man setzt dafür die Gleichung

$$I_t = \frac{E_t - \frac{L\,dI}{dt}}{R}.$$

Hieraus folgt mit Berücksichtigung der Gleichung (4) auf S. 106

$$E_{max} \sin. \omega t = \frac{L\,dI_t}{dt} + RI_t.$$

Durch Integration dieser linearen Differentialgleichung erhält man unter Vernachlässigung eines konstanten Gliedes,

das nach Eintritt des regelmäßigen Stromverlaufes Null wird, die Gleichung

$$I_t = \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin. (\omega t - \varphi)$$

unter der Bedingung

$$\text{tang}\, \varphi = \frac{2\pi L}{R T} = \omega \frac{L}{R}.$$

Die Wirkung der Selbstinduktion besteht also, wie schon oben angegeben wurde, in einer Abschwächung der Stromstärke und in einer Phasenverschiebung zwischen der Oscillation der elektromotorischen Kraft und der Oscillation des elektrischen Stromes, sodaß das Maximum der Stromstärke entsprechend der Größe der Selbstinduktion später eintritt als das Maximum der elektromotorischen Kraft.

Der im Nenner der obigen Gleichung stehende Ausdruck $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ wird als der scheinbare Widerstand des Stromkreises bezeichnet. In England ist dafür der Ausdruck impedance gebräuchlich.

Bei sehr raschem Gange einer Wechselstrommaschine ist der Ohmsche Widerstand R des Stromkreises im Verhältnis zum Koeffizienten L der Selbstinduktion so gering, daß man R^2 gegen $\omega^2 L^2$ weglassen kann, so daß also für die Stromstärke im Zeitpunkte t die Gleichung gilt

$$I_t = \frac{E_{max}}{\omega L} \sin. \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

wobei $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ein von R abhängiger Wert ist.

Die Phasenverschiebung zwischen dem Maximum der elektromotorischen Kraft und dem zurückbleibenden Maximum der Stromstärke ist in diesem Falle gleich dem Viertel einer ganzen Schwingungsperiode, wie aus Fig. 43 S. 130 ersichtlich ist, wo E die Kurve der elektromotorischen Kraft und J die Kurve des Stromes darstellt, wobei wiederum,

wie in Fig. 26 auf S. 106 die Perioden der Schwingungszeit als Abscissen aufgetragen sind.

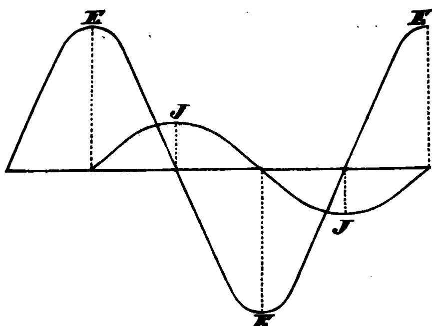


Fig. 43.

Der Koeffizient der Selbstinduktion ist als das Verhältnis des magnetischen Kraftstromes oder der Kraftlinienzahl zur elektrischen Stromstärke I zu definieren und also zu setzen $\Phi = L I$.

Dieses Verhältnis ergiebt, daß für den Koeffizienten der Selbstinduktion im C. G. S.-System als Einheit das Centimeter gilt. Für die praktische elektromagnetische Einheit dieses Koeffizienten ist dagegen 10^9 Centimeter angenommen und es wird derselbe als Quadrant bezeichnet.

73. **Selbstinduktion und Kapazität.** — Wird ein mit Selbstinduktion behafteter Teil eines elektrischen Stromkreises in Nebenschluß mit einem Kondensator verbunden, so wird durch die Ladung dieses Kondensators der Selbstinduktion entgegengewirkt und durch ein entsprechendes Verhältnis der Kapazität des Kondensators zu dem Koeffizienten der Selbstinduktion des betreffenden Teiles des Stromkreises kann die Selbstinduktion aufgehoben werden.

Nach Sumpner ist die auf diese Weise bewirkte Verminderung der Selbstinduktion des betreffenden Stromkreises

gleich dem Produkte aus der Kapazität des Kondensators und der zweiten Potenz des Stromkreiswiderstandes.

74. **Der magnetische Stromkreis.** — Das Ohmsche Gesetz ist auch auf den magnetischen Stromkreis anwendbar, indem man den mittels elektromagnetischer Erregung in einem Eisenkörper erzeugten Magnetismus als das Produkt aus der magnetischen Stromstärke oder Kraftlinienzahl Φ und dem magnetischen Widerstande R ansieht und dieses Produkt als die magnetomotorische Kraft F bezeichnet. Es gilt also in dieser Beziehung die Gleichung

$$\Phi = \frac{F}{R}.$$

Hat der magnetische Stromkreis, das ist der magnetisierte Eisenkörper die mittlere Länge l und den Querschnitt s (in Centimetern) und bezeichnet man mit ϱ den spezifischen magnetischen Widerstand, mit μ das magnetische Leitungsvermögen, oder die magnetische Durchdringlichkeit (Permeabilität), so gilt die Gleichung

$$R = \varrho \frac{l}{s} = \frac{1}{\mu} \frac{l}{s},$$

wobei der magnetische spezifische Widerstand der Luft als Einheit gilt.

Ist N die Zahl der das Eisen umgebenden und den elektrischen Magnetisierungsstrom I führenden Drahtwindungen, das ist die Bewickelungszahl, so ist die Stärke des magnetischen Kraftstromes oder die Zahl der magnetischen Kraftlinien (pro Quadratcentimeter des Eisenquerschnitts) durch die Gleichung bestimmt

$$\Phi = \frac{4 \pi N I . \mu s}{l}.$$

Die Dimensionen von Φ sind hiernach

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}.$$

75. **Die Kraftlinienzahl.** — Wenn in jedem Quadratcentimeter der Querschnittsfläche eines magnetisierten Eisenkerns die Magnetisierungsstärke I mit der Kraft von 1 Dyn wirkt und die Querschnittsfläche beziehungsweise die Polfläche des Magnets S Quadratcentimeter groß ist, so hat man mit Rücksicht auf das C. G. S.-System anzunehmen, daß durch die magnetische Induktion B die Induktion durch $S = \Phi$ Dynes oder durch $\Phi = S$ Kraftlinien bewirkt wird. Ruft also die Magnetisierungsstärke durch Induktion a Dynes, das ist a Kraftlinien im Quadratcentimeter der Polfläche hervor, so ist die Gesamtzahl der induzierten Kraftlinien $\Phi = a\,S$.

Auf einen in der Entfernung r befindlichen Punkt des von einem Magnetpole hervorgebrachten Kraftfeldes befindlichen Punkt wirkt das Magnetfeld nach der Coulombschen Regel mit der Kraft

$$F = \frac{m m'}{r^2}$$

oder mit der magnetischen Feldstärke

$$H = \frac{F}{m'} = \frac{m}{r^2}$$

ein. Für eine kleine Fläche $\triangle s$ ist also die Feldstärke

$$H = \frac{m \triangle s}{r^2}.$$

Ist diese Fläche eine Kugel vom Halbmesser r, deren ganze Fläche $4 \pi r^2$ ist, so ist die Feldstärke gleich $4 \pi m$. Hierbei bilden die Kraftlinien geschlossene Stromkreise. Wird eine Drahtschleife, also etwa ein Ring aus Kupferdraht, wie Fig. 46 S. 138 zeigt, in ein magnetisches Feld gebracht, und wirkt das Magnetfeld auf jeden Quadratcentimeter dieser Stromkreisfläche mit der Einheit der Kaftlinienzahl (nach dem C. G. S.-System), das ist mit einem Dyn ein, so ist anzunehmen, daß für die ganze Fläche S die Kraftlinienzahl $\Phi = S$ Dynes ist. Wird die gedachte Drahtschleife gegen den

Magnetpol, also in der Richtung des wachsenden magnetischen Potentials, das ist in der Richtung der wachsenden Stärke oder Dichtheit der Kraftlinien verschoben, so beträgt nach dem Verlauf einer verschwindend kleinen Zeit d t den Zuwachs der Kraftlinienzahl d Φ und es wird dadurch in dem elektrischen Stromkreise die elektromotorische Kraft

$$e = -\frac{d\,\Phi}{dt} = -\frac{1}{10^8}\,\frac{d\,\Phi}{dt}\ \text{Volt}$$

erregt.

Das negative Vorzeichen der Differentialquotienten hat die Bedeutung, daß die auf diese Weise induzierte elektromotorische Kraft für die Bewegung des Leiters einen entsprechenden Arbeitsaufwand erfordert, welcher der im Leiter induzierten elektrischen Energie gleichwertig ist.

76. **Die magnetische Induktion.** — Wird in ein magnetisches Kraftfeld ein magnetisierungsfähiger Körper, insbesondere ein Eisenkörper gebracht, so wirkt derselbe verdichtend auf die Kraftlinien ein, indem derselbe infolge seiner magnetischen Induzierbarkeit oder Magnetisierungsfähigkeit selbst magnetische Kraftlinien erzeugt, deren Zahl als die magnetische Induktion B bezeichnet und durch die Gleichung ausgedrückt wird

$$B = H + 4\,\pi\,I.$$

Bei gewöhnlicher Temperatur ändert sich die Magnetisierungsstärke I mit der magnetisierenden Kraft

$$H = \frac{4\,\pi\,N\,I}{l}$$

und mit der magnetisierten Substanz. Besonders magnetisierungsfähige Substanzen sind Eisen, Nickel und Kobalt.

Fig. 44 S. 134 zeigt die graphische Darstellung der nach Ewings Versuchen für diese drei Substanzen mittels Einwirkung einer von Null bis 50 C. G. S.-Einheiten (Dynes pro Quadratcentimeter) gesteigerten magnetisierenden Kraft erhaltenen Werte von I in C. G. S.-Einheiten. Für

Schmiedeeisen beträgt hiernach die Magnetisierungsstärke nahezu 1400 Dynes pro Quadratcentimeter Fläche

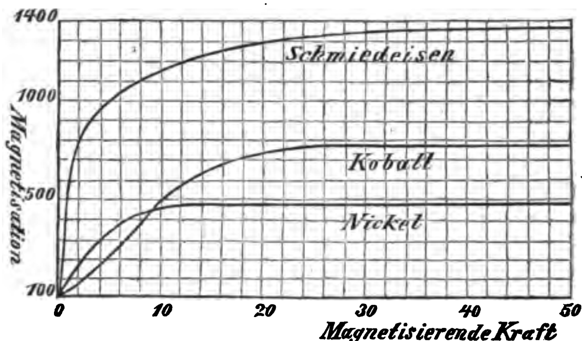


Fig. 44.

des magnetisch induzierten Eisens. Ein derartig induzierter Magnetpol würde danach eine Tragkraft von $\frac{1400}{981} = 1.4$ Gramm pro Quadratcentimeter ungefähr besitzen

77. **Die magnetische Sättigung.** — Durch seine erwähnten Versuche hat Ewing die für Eisen, Nickel und Kobalt durch die magnetische Induktion zu erreichenden Maximalwerte von $4\pi I$ bestimmt. Diese Maximalwerte sind jedoch immerhin theoretisch nur als angenäherte zu betrachten, indem durch weitere Verstärkung der magnetisierenden Kraft wohl auch noch höhere Werte als erreichbar zu erachten sind, jedoch ist zuletzt die Zunahme so gering, daß für die Praxis die erreichten Werte als das Maximum der magnetischen Sättigung anzusehen sind, indem, wie Fig. 44 zeigt, die Magnetisierungskurven schließlich fast ganz horizontal verlaufen. Es hat also der bezügliche Wert $4\pi I$ als eine Konstante zu gelten, so daß die Gleichung dafür besteht

$$B = H + \text{Konstante}.$$

Die von Ewing gefundenen Werte sind

	$4 I \pi$
Schmiedeeisen	21360
Gußeisen	15580
Nickel	5000—6500
Kobalt	16300

78. **Magnetisierungskoeffizient und Hysteresis.** — Wird ein Stab aus weichem Eisen im neutralen Zustande in ein magnetisches Feld gebracht und dessen zunehmender Wirkung ausgesetzt, so nimmt, wie schon bemerkt wurde, die magnetische Kraft des Stabes nach dem Verlauf der Kurve OM (Fig. 45)

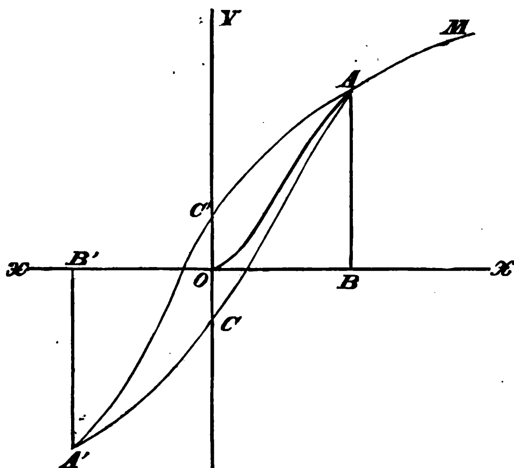


Fig. 45.

erst etwas allmählich, dann rasch und schließlich wieder allmählich bis zur Erreichung des magnetischen Maximums zu. Die auf der horizontalen Koordinatenachse OX abgetragenen Abscissen entsprechen der zunehmenden Kraft des

magnetischen Feldes, die zur vertikalen Koordinatenachse OY parallelen Ordinaten entsprechen der Stärke der Magnetisierung des Eisenstabes. Dividiert man den Wert der an einer Stelle des Magnetfeldes auftretenden Magnetisierungsstärke des Eisenstabes mit der entsprechenden Kraft des magnetischen Feldes, so erhält man den Koeffizienten der magnetischen Sättigung.

Wird der Eisenstab, nachdem er in der Kurve OAM (Fig. 45) den Punkt A erreicht hat, magnetisierenden Kräften unterworfen, die von OB bis Null abnehmen, so kehrt der Eisenstab doch nicht wieder bezüglich der für die erste Magnetisierungskurve geltenden Abscissen in die vorher durchlaufenen Zwischenzustände des Magnetismus zurück, sondern sein magnetischer Zustand ändert sich nunmehr entsprechend einer Kurve ACA′ und die Ordinate OC im Ausgangspunkte O der Abscissen ergiebt den remanenten Magnetismus, indem das Metall in dem einmal angenommenen magnetischen Zustande zu verbleiben sucht, der bei einer Änderung des Magnetisierungsprozesses einmal vorhanden ist. Ändert alsdann die magnetisierende Kraft ihren Sinn, indem sie in einen negativen Wert OB′ = OB übergeht, so ruft sie die durch die Kurve A′C′A dargestellten aufeinanderfolgenden Werte der Magnetisierung hervor. Auf diese Weise kann durch die sich wiederholende Bewegung eines Stückes weichen Eisens innerhalb des magnetischen Kraftfeldes zweier entgegengesetzten Magnetpole ein Kreisprozeß der Magnetisierung im Eisen erregt werden, der auf der Verzögerung der Entmagnetisierung beruht. Die Kurve der Magnetisierung kehrt zwar zu dem Ausgangspunkte zurück, aber ihr Weg ist bei der Wiederzunahme der magnetisierenden Kraft ein ganz anderer, als bei der Abnahme dieser Kraft. Dieses Verharren im einmal angenommenen Zustande und Zurückbleiben gegen die von der wirksamen magnetisierenden Kraft angestrebte Änderung des magnetischen Zustandes wird „Hysteresis“ d. h. Zurückbleiben, Verzögern oder wohl auch magnetische Trägheit genannt.

In der Magnetisierung macht sich also der Einfluß der Zeit geltend, indem eine merkliche Änderung des Grades der Magnetisierung des magnetischen Materials auch eine merkliche Zeitdauer erfordert. Je größer der Querschnitt eines in dieser Beziehung betrachteten Eisenstabes ist, um so mehr tritt auch die Verzögerung in der Aufnahme oder Abgabe der magnetischen Kraftäußerung hervor. Diese magnetische Trägheit (Hysteresis) in der Magnetisierbarkeit und Entmagnetisierung des Eisens wird dadurch vermindert, daß man möglichst weiches Eisen benutzt und den Eisenkern der Induktionsspulen aus dünnen Lamellen oder Drähten bildet.

79. **Einfluß der Temperatur auf den Magnetismus.** — Durch starke Temperaturerhöhung wird die Magnetisierbarkeit des Eisens und der übrigen magnetisierbaren Metalle geschwächt; trotzdem kann aber Stahl dadurch bleibend magnetisch gemacht werden, daß man ihn im rotglühenden Zustande dem Einflusse einer magnetisierenden Kraft aussetzt und unter der fortdauernden Einwirkung dieser Kraft rasch abkühlt.

Bis zu einer Temperaturerhöhung von 680° C. zeigt das Eisen seine magnetische Eigenschaft nahezu eben so wie in der Kälte, und für schwache magnetisierende Kräfte nimmt sogar die Aufnahmefähigkeit des Eisens für Magnetismus etwas zu. Gegen 700° erreicht diese Aufnahmefähigkeit für eine magnetisierende Kraft von 0.3 C. G. S.-Einheiten den Wert von 11000 C. G. S.-Einheiten. Bei etwa 750° verschwindet aber diese Aufnahmefähigkeit vollständig. Läßt man glühendes Eisen langsam abkühlen, so leuchtet es an dieser Temperaturgrenze plötzlich wieder auf infolge frei werdender, als Wärme hervortretender Energie, die durch Änderung des molekularen Zustandes hervorgerufen wird. Diese als Recalescenz bezeichnete Erscheinung scheint mit dem kritischen Punkte der Aufnahmefähigkeit für Magnetismus im Zusammenhange zu stehen.

80. **Diamagnetismus.** — Von Faraday wurde die bereits seit längerer Zeit bekannte Eigenschaft gewisser Körper, von beiden Magnetpolen gleichmäßig abgestoßen zu werden, als

Diamagnetismus bezeichnet. Wird ein aus einem diamagnetischen Körper gebildeter horizontal im schwebenden Gleichgewicht aufgehängter Stab zwischen die Pole eines starken Magnets gebracht, so stellt sich dieser Stab rechtwinklig zur Verbindungslinie der Polmitten, das ist rechtwinklig zur Richtung der Kraftlinien des magnetischen Feldes, ein. Die meisten Flüssigkeiten, mit Ausnahme der Salze magnetischer Substanzen, verhalten sich diamagnetisch; dasselbe ist der Fall mit der Lichtflamme und den Gasen, mit Ausnahme des Sauerstoffes und des ihm wohl verwandten Ozons. Der Diamagnetismus tritt stets nur sehr schwach auf und äußert sich nur unter der Einwirkung sehr starker Magnetpole.

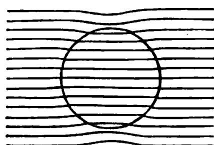


Fig. 46.

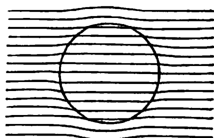


Fig. 47.

Fig. 46 zeigt die Verteilung der Kraftlinien in einem magnetischen kreisförmigen Querschnitt und Fig. 47 in einem diamagnetischen Querschnitt.

Fünfter Abschnitt.

Die elektrischen Maßeinheiten und die Messung der elektrischen Größen.

Siebzehntes Kapitel.

Die praktischen Maßeinheiten.

81. **Die Beziehung der praktischen Maßeinheiten zu dem C. G. S.-System.** — Die nach dem C. G. S.-System bestimmten elektrischen Maßeinheiten zeigten sich bei der Anwendung für den praktischen Gebrauch bald zu klein, bald zu groß, weshalb man sich veranlaßt fand, auf den Kongressen der Elektrotechniker diese Einheiten mit Rücksicht auf deren bequemen Gebrauch mit Potenzen der Zehn zu multiplizieren. Hiernach sind die folgenden Bestimmungen getroffen worden:

Das Ohm ist eine Maßeinheit des Widerstandes und es ist

1 Ohm = 10^9 C. G. S.-Einheiten des elektrischen Widerstandes.

Für größere Widerstände gebraucht man das Megohm, für kleinere Widerstände das Mikrohm und es ist

1 Megohm = 10^6 Ohms = 10^{15} C. G. S.-Einheiten des elektrischen Widerstandes.

1 Mikrohm = 10^6 Ohms = 10^3 C. G. S.-Einheiten des elektrischen Widerstandes.

Das Volt, als Maßeinheit der elektromotorischen Kraft und der Potentialdifferenz.

1 Volt $= 10^8$ C. G. S.-Einheiten der elektromotorischen Kraft.

Das Ampère als Maßeinheit der Stromstärke. Es wird diese Einheit der Stromstärke durch eine Potentialdifferenz von 1 Volt zwischen den Enden eines Leiters vom Widerstande gleich 1 Ohm hervorgebracht. Man hat also

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}} = \frac{10^8}{10^9} = 10^{-1} \text{ C. G. S.-Einheiten}$$
der Stromstärke.

Das Coulomb und die Ampèrestunde als Maßeinheit der Elektrizitätsmenge.

Die praktische Einheit der Elektrizitätsmenge, welche durch einen Leiter während einer Sekunde hindurchgeht, wenn die Stromstärke gleich ein Ampère ist, und man hat:

1 Coulomb $=$ 1 Ampère $\times$ 1 Sekunde $= 10^{-1}$ C. G. S.-Einheiten der Elektrizitätsmenge.

Für technische und industrielle Zwecke, wo man gewöhnlich die Stunde als kleinsten Bruchteil der Zeit in Rechnung zieht, benutzt man als Einheit der Elektrizitätsmenge die Ampèrestunde; es ist:

1 Ampèrestunde $=$ 1 Ampère $\times$ 3600 Sekunden $=$ 3600 Coulombs.

Das Farad und das Mikrofarad als Maßeinheit der Kapazitätsmenge.

Die praktische Einheit der Kapazität ist die Kapazität eines Kondensators, der durch ein Coulomb zum Potential von ein Volt geladen wird. Man bezeichnet diese Einheit als Farad und es ist:

$$1 \text{ Farad} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}} = \frac{10^{-1}}{10^8} = 10^9 \text{ C. G. S.-Einheiten}$$
der Kapazität.

Für den praktischen Gebrauch ist das Farad noch eine sehr große Maßeinheit, weshalb man das Mikrofarad benutzt, und es ist:

1 Mikrofarad $= 10^{-6}$ Farad,

daher

1 Mikrofarad $= 10^{-9} \times 10^{-6} = 10^{-15}$ C. G. S.-Einheiten der Kapazität.

Das Volt-Coulomb oder Joule als praktische Einheit der elektrischen Energie.

Man versteht unter dieser praktischen Einheit der Energie die Arbeit, die durch ein Coulomb bei der elektromotorischen Kraft von ein Volt hervorgebracht wird.

1 Joule = 1 Coulomb $\times$ 1 Volt $= 10^{-1} \times 10^{8} = 10^{7}$ Ergs oder

1 Joule oder 1 Volt-Coulomb $= \frac{1}{9.81}$ Meterkilogramm.

Das Volt-Ampère oder Watt als die praktische Einheit der elektrischen Arbeitsleistung.

Da bekanntlich unter der Arbeitsleistung oder Arbeitsstärke das Verhältnis der Arbeit zur Zeit verstanden wird, so ist die praktische elektrische Arbeitsleistung:

$\frac{1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Sekunde}}$ = 1 Volt $\times$ 1 Ampère = 1 Volt-Ampère oder Watt,

und es ist daher:

1 Watt $= 10^{8} \times 10^{-1} = 10^{7}$ Ergs in der Sekunde, oder

1 Watt $= \frac{1}{9.81}$ Meterkilogramm in der Sekunde.

Ferner hat man:

Eine Dampfpferdestärke = 75 Meterkilogramm in der Sekunde ist $75 \times 9.81 = 736$ Watts.

Eine englische Pferdestärke (Horse power) = 75.9 Meterkilogramm in der Sekunde = 746 Watts.

Die elektrische Energie ist also gleich dem Produkt aus der elektrischen Arbeitsleistung und der Zeit. Um für industriell-technische Zwecke ein bequemes größeres Energiemaß zu erhalten, hat man die Wattstunde und ferner auch noch die Kilowattstunde eingeführt, und es ist:

1 Wattstunde = 1 Watt × 3600 Sekunden = 3600 Joules und 1 Kilowattstunde = 1000 Wattstunden.

Achtzehntes Kapitel.

Messung des Widerstandes.

82. **Definition.** — Der elektrische Widerstand wird bedingt durch die materielle Beschaffenheit und die Dimensionen, das ist durch Querschnitt und Länge des Elektrizitätsleiters; ferner ist der elektrische Widerstand aber auch von der Temperatur des Leiters abhängig und, insofern diese Temperatur durch die in der Zeiteinheit zwischen zwei Punkten des Leiters übergehende Größe der elektrischen Energie bedingt wird, abhängig von dieser Energiegröße. Für gewöhnlich wird jedoch der elektrische Widerstand R einfach nach dem Ohmschen Gesetz durch das Verhältnis der elektromotorischen E zur Stromstärke I bestimmt, wonach die Gleichung besteht:

$$R = \frac{E}{I}.$$

83. **Widerstandsmaße.** — Die Messung eines Widerstandes erfolgt durch dessen Vergleichung mit einem angenommenen Normalwiderstande, wozu die Siemenssche Einheit, das ist eine Quecksilbersäule von 1 qmm Querschnitt und von 106 cm Länge, benutzt wird.

Um die Größe des elektrischen Widerstandes in absoluten Einheiten nach dem C. G. S.-System zu bestimmen, hat man verschiedene Messungsmethoden in Anwendung gebracht. Die hauptsächlichsten Methoden, die man zur Messung eines elektrischen Widerstandes benutzt, zerfallen in drei Gruppen:

1. Der Widerstand eines Leiters kann aus der Wärme-Energie bestimmt werden, die während einer bestimmten Zeit durch einen Strom von bekannter Stärke in diesem Leiter entwickelt wird.

2. Der Widerstand eines Stromkreises kann durch die Stromstärke bestimmt werden, die eine bekannte elektromotorische Kraft in diesem Stromkreise erzeugt.

In der gewöhnlichen Praxis benutzt man jedoch die sogenannte Substitutionsmethode äquivalenter Widerstände, wobei man beispielsweise folgendermaßen verfährt:

Man benutzt eine Normalbatterie von einigen Daniell-Elementen, die mit einem Draht von dem noch unbekannten Widerstand R nebst einem Galvanometer den Stromkreis bildet. Man erhält so einen Strom von bestimmter Stärke; diese Stromstärke ist aus der Ablenkung der Galvanometernadel ersichtlich.

Wird der Draht vom Widerstande R alsdann durch einen Draht von bekanntem Widerstande und variabler Länge ersetzt, so kann man diese Länge so regeln, bis dieselbe Stellung der Galvanometernadel erlangt wird, woraus folgt, daß die geregelte Drahtlänge von bekanntem Widerstande den gesuchten Widerstand R ergiebt.

Diese Art Widerstandsbestimmung wurde früher mit einem sogenannten Rheostat oder Regulierwiderstand ausgeführt, wobei ein langer dünner Draht, von dessen Längeneinheit der Widerstand bekannt war, um einen hölzernen Cylinder in isolierten Windungen aufgewunden wurde, so daß man jede beliebige Länge dieses Drahtes als Normalwiderstand in einen Stromkreis einschalten konnte.

Diese Messungsmethode erfordert nur ein gewöhnliches Galvanometer von genügender Empfindlichkeit. Bei einer Tangentenbussole wird der unbekannte Widerstand R, durch den der Strom an der Tangentenbussole den Ablenkungswinkel δ liefert, durch einen bekannten Widerstand R' ersetzt, durch welchen dieselbe Stromstärke die Bussole auf den Winkel δ' einstellt. Da die Stromstärken den Tangenten

der Ablenkungswinkel proportional sind, so stehen die betreffenden Widerstände dazu in umgekehrter Proportion und es besteht daher die Gleichung:

$$\frac{\tang \delta}{\tang \delta'} = \frac{R'}{R},$$

woraus folgt:

$$R = \frac{R' \tang \delta'}{\tang \delta}.$$

Die Messung eines Widerstandes kann auch mittels eines Differentialgalvanometers und eines Satzes von Normalwiderstandsrollen ausgeführt werden. Diese Widerstandsrollen sind in einem sogenannten Widerstandskasten angebracht und können mittels eingesteckter Kontaktschlüssel oder Stöpsel beliebig in den Stromkreis eingeschaltet werden.

Fig. 48 zeigt schematisch die Anordnung eines solchen Widerstandskastens oder Stöpselrheostats. Eine Anzahl von Metallplatten a, a_1, a_2, a_3 u. s. f. sind paarweis durch die Widerstandsrollen c, c_1, c_2, c_3 u. s. f. verbunden und können mittels Stöpsel, die aus konischen Metallzapfen mit einem Handgriff aus Ebonit bestehen, durch Einstecken derselben in die Löcher I, II, III u. s. f. mit der Metallschiene b in elektrische Verbindung gebracht und somit in den Stromkreis eingeschaltet werden, so daß man den Widerstand des Stromkreises stufenweis um die Widerstände der Drahtrollen c, c + c_1, c + c_1 + c_2 u. s. f. vergrößern oder eventuell durch allmähliches Ausschalten der vorher eingeschalteten Widerstände vermindern kann.

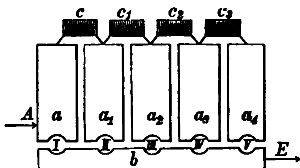


Fig. 48.

Die Reihe der in den Widerstandskasten eingesetzten Drahtrollen kann beispielsweise den Widerständen von 1, 2, 2, 5; 10, 20, 20, 50; 100, 200, 200, 500 .... bis zu 10 000 Ohms entsprechen. Indem man von den vorher eingesetzten sämtlichen Stöpseln einen herauszieht, kann man jede beliebige Widerstandsspule in den Stromkreis einschalten und durch Herausziehen einer entsprechenden Anzahl passend gewählter Stöpsel jede gewünschte Widerstandsgröße bis zu 20 000 Ohms erhalten.

Um sehr große Widerstände zu messen kann man so verfahren, daß man mittels einer Normalbatterie einen Kondensator während bestimmter Zeit durch den Widerstand hindurch ladet und alsdann die aufgespeicherte elektrische Energie durch ein geeignetes Galvanometer hindurch entladet.

Man benutzt hierzu ein sogenanntes „ballistisches Galvanometer“, das mit einer langen und entsprechend schweren Nadel versehen ist, die eine verhältnismäßig große Schwingungsdauer hat. Infolge der langsamen Schwingung einer solchen Nadel werden die Impulse des kurzdauernden Stromes in der Schwingung addiert und der Sinus des halben Winkels des ersten Ausschlages der Nadel ist daher der durch das Galvanometer gesendeten Elektrizitätsmenge proportional.

Ein wichtiger Apparat zur Messung von Widerständen ist die Wheatstonesche Brücke.

84. Die Einrichtung der Wheatstoneschen Brücke und deren Wirkungsweise. — Diese zuerst von Christie 1833 angegebene und später von Wheatstone zur Messung von Widerständen benutzte Vorrichtung, die als Wheatstonesche Brücke oder Schleife bezeichnet wird, besteht (nach Fig. 49 S. 146) aus einem durch vier Widerstände R_1, R_2, R_3 und R_4 gebildeten Viereck QMPN.

Mit den diagonalen Eckpunkten P und Q ist die galvanische Batterie B verbunden, deren in das System eintretender Strom somit im Punkte P in zwei Teile nach M und N gespalten wird, die sich im Punkte Q wiederum vereinigen.

Die vier Seiten der Brücke werden als deren „Zweige" bezeichnet und aus dem Verhältnis, das zwischen den Widerständen R_1, R_2, R_3 und R_4 dieser Brückenzweige besteht, läßt sich, sobald drei dieser Widerstände bekannt sind, der vierte Widerstand berechnen, wobei zu berücksichtigen, daß das Potential in einem Leiter proportional zu dem vom Strome überwundenen Widerstand abnimmt. Demnach ist das Potential des Batteriestromes im Punkte P bereits um einen gewissen Betrag verringert worden, d. h. es besteht zwischen

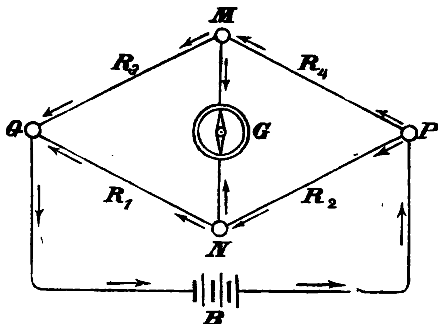


Fig. 49.

der betreffenden Batterieklemme und der Brückenklemme P ein dem Widerstande der Zuleitung entsprechender Potentialabfall. In gleicher Weise vollzieht sich ein Potentialabfall von P bis M und von M bis Q, sowie von P bis N und von N bis Q. Besteht zwischen den Widerständen R_1 und R_2 dasselbe Verhältnis wie zwischen den Widerständen R_3 und R_4, so sind in den Punkten M und N die Potentiale gleich.

Um die Gleichheit oder Ungleichheit der Potentiale in M und N beobachten zu können, sind diese Punkte der Brücke mit einem Galvanometer G verbunden, dessen Nadel sich auf den Nullpunkt der Skala einstellt, sobald die Gleichheit der Potentiale in M und N vorhanden ist. Dies ist der Fall,

wenn bezüglich der Widerstände in den vier Brückenzweigen die Proportionen bestehen:

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_4$$

oder

$$R_1 : R_3 = R_2 : R_4.$$

Sind beispielsweise die Widerstände R_1, R_2 und R_3 bekannt, während R_4 der unbekannte Widerstand ist, so wird dessen Wert bestimmt durch die Gleichung:

$$R_4 = \frac{R_2 \times R_3}{R_1}.$$

Gewöhnlich werden die Wheatstoneschen Brücken so konstruiert, daß die Zweige oder Arme MQ und NQ mit mehreren hintereinandergeschalteten Widerstandsrollen versehen sind, und im Zweige NP sich ein vollständiger Satz von Widerständen eingeschaltet befindet. Überhaupt hat die Wheatstonesche Brücke in ihrer praktischen Ausführung die Form eines Widerstandskastens.

In Fig. 49 sind P und Q die beiden mit der Batterie B verbundenen Brückenklemmen, M und N die beiden mit dem Galvanometer G verbundenen Brückenklemmen; die Widerstände der vier Brückenzweige sind R_1, R_2, R_3 und R_4. Soll kein Strom durch das Galvanometer gehen, so müssen die Punkte M und N dasselbe Potential haben. Bezeichnet man mit V_p und V_2 die Potentiale der Punkte P und Q und nimmt man an, daß zwischen M und N keine elektrische Verbindung bestehe, so ist das Potential zwischen M und Q:

$$(V_p - V_2)\,\frac{R_3}{R_3 + R_4} = (V_p - V_2)\,\frac{1}{1 + \frac{R_4}{R_3}},$$

und das Potential zwischen Q und N entsprechend:

$$(V_p - V_q)\,\frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}}.$$

Die Potentiale in M und N sind einander gleich, und der die beiden Punkte verbindende Draht ist stromlos, wenn die Gleichung besteht:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \text{ oder } R_4 R_1 = R_2 R_3,$$

wie schon oben angeführt worden ist.

Bezeichnet man den Widerstand R_4, als den unbekannten, mit x, so hat man:

$$x = \frac{R_2}{R_1} R_3$$

85. Hauptformen der Wheatstoneschen Brücke. — Die jetzt am meisten benutzten Formen der Wheatstoneschen Brücke sind die Rollenbrücke und die Chordenbrücke*). Die Widerstandskasten sind gewöhnlich derart eingerichtet, daß sie die Wheatstonesche Brücke ohne weiteres herstellen lassen. Die Form dieser Kasten ist viereckig oder kreisrund cylindrisch; neuerdings wird die cylindrische Form als die bequemere meist vorgezogen. Die Anordnung der Brücke mit Widerstandsspulen wurde bereits besprochen.

Die Chordenbrücke, die von Kirchhoff zum Messen kleiner Widerstände und zur Vergleichung von Etalons (Normalwiderständen) vorgeschlagen wurde, ist eine Modifikation der oben angegebenen Form, wobei die eine der mit dem Galvanometer verbundenen Ecken durch einen geradlinigen Draht CD (Fig. 50) von etwa 1 m Länge und 1 bis 2 mm Durchmesser ersetzt ist, auf dem ein mit dem Galvanometer G verbundener Kontakt M verschiebbar ist, um den veränderlichen Widerstand zu ersetzen und damit am Galvanometer das Gleichgewicht herzustellen.

Bezeichnet man mit l die Länge des in allen seinen Teilen mit gleichem Widerstande begabten Drahtes und mit x den Abstand CM des Kontaktes vom Ausgangspunkte C und

*) Vergl. Mascart-Joubert a. a. O. S. 337.

setzt man ferner die Widerstände der Brückenzweige $QC = R_3$ und $PD = R_4$, in Längeneinheiten des Drahtes ausgedrückt, so ist:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3 + x}{R_4 + l - x}.$$

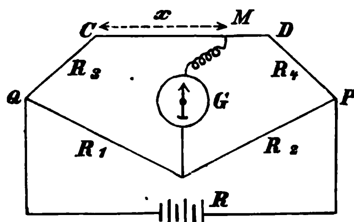


Fig. 50.

Der Draht besteht meistens aus Neusilber, während die drei anderen Seiten der Brücke in diesem Falle aus breiten Kupferbändern hergestellt sind, deren Widerstand unberücksichtigt bleiben kann. Die Stellung des verschiebbaren Kontaktes kann an einem Maßstabe abgelesen werden.

Der aus Platin hergestellte Kontakt liegt mit einer scharfen Kante auf dem Drahte, um die Berührungsstelle genau zu bestimmen.

Zur Messung sehr schwacher Widerstände wird unter anderen Vorrichtungen die Doppelbrücke von W. Thomson benutzt, wobei die Einrichtung so getroffen ist, daß der Einfluß des Kontaktwiderstandes vernachlässigt werden kann.

Fig. 51 S. 150 zeigt die Anordnung. Wenn x der unbekannte Widerstand und R der Vergleichswiderstand ist, während R_1, R_2, R_3 und R_4 die veränderlichen Widerstände sind und l ein Zwischenwiderstand ist, so besteht als Bedingung für die Gleichgewichtslage (Nullstellung) der Galvanometernadel die Gleichung:

$$\frac{R}{R_4} - \frac{x}{R_3} + \left(\frac{R_2}{R_4} - \frac{R_1}{R_3}\right) \frac{l}{R_1 + R_2 - l} = 0.$$

Um das dritte Glied der linken Seite der Gleichung vernachlässigen zu können, macht man l sehr klein und regelt die Widerstände R_1, R_2, R_3 und R_4 der Brückenzweige derartig, daß der Ausdruck in der Klammer gleich Null wird. Unter diesen Umständen geht die Gleichung über in

$$\frac{R}{R_4} = \frac{x}{R_3}.$$

Durch Hockin und Matthießen ist diese Anordnung insofern abgeändert worden, als die Kontaktwiderstände, die

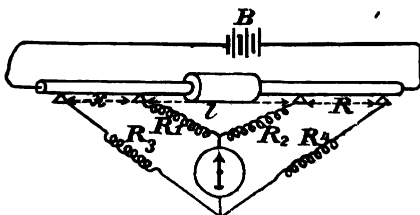


Fig. 51.

zu mancherlei Fehlern Anlaß gaben, in den Stromkreis des Galvanometers eingeführt worden sind, so daß sie bei der Gleichgewichtsstellung in Null übergehen.

Von O. Frölich ist die Wheatstonesche Brücke verallgemeinert worden*).

In der gewöhnlichen Anordnung dieses Apparates (Fig. 50 S. 149) enthalten die vier Seitenzweige bloße Widerstände, der eine Diagonalzweig das Galvanometer und der andere die Batterie. Wird bei der Schließung des Batteriezweiges der durch das Galvanometer gehende

*) Vergl. Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie 1887. S. 156.

Zweigstrom gleich Null, so gilt für die Widerstände der Seitenzweige die Proportion:

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_4.$$

Es sind aber bezüglich dieser Anordnung der Brücke auch Methoden angegeben worden, bei denen in einen Seitenzweig eine Batterie eingeschaltet wird, namentlich von Mance; eine andere Methode wurde von Lutteroth angeregt und von Siemens und Halske in die Technik eingeführt. Bei der letzteren Methode ist eine Batterie in den zu schließenden und zu öffnenden Zweig eingeschaltet, bei der ersteren in einen der drei übrigen, geschlossenbleibenden Zweige. Bei beiden Methoden besteht die obige Proportion zwischen den Widerständen der Seitenzweige, wenn im Galvanometerzweig beim Schließen und Öffnen des anderen Diagonalzweiges dieselbe Stromstärke herrscht. Mit Bezug hierauf stellte O. Frölich den allgemeinen Satz auf:

Wenn in dem Wheatstoneschen Stromschema in sämtlichen sechs Zweigen beliebige elektromotorische Kräfte wirken und beim Schließen und Öffnen des einen Diagonalzweiges die Stromstärke in dem andern Diagonalzweige dieselbe bleibt, so herrscht (mit Bezug auf Fig. 50) zwischen den Widerständen der Seitenzweige die Proportion

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_4$$

oder Gleichheit der Produkte der an das Galvanometer sich anschließenden Seitenzweige.

Nach dem Frölichschen Satze ist es gestattet, selbst in den Galvanometerzweig eine Batterie einzuschalten, und man kann diese Einschaltung dazu benutzen, den in diesem Zweige ohne Batterie herrschenden Strom beinahe ganz auszugleichen, so daß das empfindlichste Galvanometer angewendet werden kann, wenn auch in den Seitenzweigen die stärksten Ströme kreisen. Hierdurch wird es aber anderseits möglich, in dem zu schließenden und zu öffnenden Diagonalzweig ebenfalls nur ganz schwache Ströme zu erhalten. Die Differenz der

Ströme in den Seitenzweigen, bei Schließung und Öffnung des Diagonalzweiges, kann also beliebig klein gemacht werden. Endlich kann man den Diagonalzweig einmal so wählen, daß der Strom in dem Seitenzweig, der den zu messenden Körper enthält, verstärkt wird, das andere Mal so, daß jener Strom geschwächt wird; das Mittel aus diesen beiden Messungen wird alsdann wenig von der Wahrheit abweichen. Voraussetzung der Anwendbarkeit der Methode ist natürlich, daß der Körper sich während der Messung gar nicht ändert, oder nur in der Weise Veränderungen unterliegt, daß die Messungen denselben folgen können.

Auf diese Weise kann der Erdwiderstand, wie er bei Blitzableitern, Telegraphen, elektrischen Bahnen ꝛc. gemessen werden muß, genau bestimmt werden. Ferner eröffnet diese Methode einen Weg, den wirklichen Widerstand bei Kondensatoren und Kabeln zu bestimmen, vorausgesetzt, daß dieser nicht die Grenze der Brückenmessung übersteigt. Eine nicht unwichtige technische Anwendung betrifft die Messung des Widerstandes des rotierenden Ankers einer Dynamomaschine. Dieser Widerstand erscheint nämlich infolge der Selbstinduktion beim Passieren der Bürsten größer, als beim ruhenden Anker. Die interessanteste Anwendung bildet aber die Messung des Widerstandes im elektrischen Lichtbogen.

Das Ohmmeter von Ayrton und Perry dient zur Messung des Widerstandes in einem Stromkreise, durch den ein starker, die Leitung mehr oder minder erwärmender Gleichstrom geht. Es kann damit der Widerstand in irgend einem Teile eines derartigen Stromkreises für den Zeitpunkt, wo die Untersuchung stattfindet, bestimmt werden, um somit auch den Einfluß der Erwärmung auf den Widerstand an der betreffenden Stelle zu ermitteln.

Der Apparat besteht aus zwei rechtwinklig zu einander gestellten ringförmigen Drahtspulen, von denen die eine, als Widerstandsspule, aus vielen Windungen dünnen Drahtes, die andere dagegen, als Stromspule, aus nur wenigen Windungen dicken Drahtes gebildet ist. Die Widerstandsspule

wird in den Nebenschluß zu dem zu messenden Widerstande, die Stromspule in den Hauptstromkreis, von dem jener Widerstand einen Teil bildet, eingeschaltet. Beide Spulen wirken auf eine in ihrer Mitte aufgehängte Nadel aus weichem Eisen.

Bezeichnet man für die Stromspule den Durchmesser mit a und die Windungszahl mit n, für die Widerstandsspule den Durchmesser mit a′ und die Windungszahl mit n′, den Widerstand des Nebenschlusses, einschließlich der Widerstandsspule, mit r und den zu suchenden Widerstand vom betreffenden Teile des Hauptstromkreises mit R, so gilt für den Ablenkungswinkel α der Nadel die Gleichung:

$$\text{tang}\,\alpha = \frac{a\,n'}{a'\,n} \cdot \frac{R}{R + r}.$$

Wenn r gegen R sehr groß ist, so sind die Widerstände den Tangenten der Ablenkungswinkel nahezu proportional.

Zur Vergleichung elektrischer und magnetischer Widerstände wird, als ein sehr empfindlicher Apparat, die von Hughes konstruierte Induktionswage benutzt, wobei die Thatsache zu Grunde liegt, daß die in einem Leiter induzierten Induktionsströme unter sonst gleichen Verhältnissen dem Widerstande umgekehrt proportional sind. In vielen Fällen, in denen die gewöhnlichen Methoden der Widerstandsmessung oder Widerstandsvergleichung nicht anwendbar sind, lassen sich die Induktionsströme mit Vorteil benutzen. Die einfachste Methode ist, hierbei die Induktionswirkungen zweier verschiedener Stromkreise unter Anwendung eines Telephons ins Gleichgewicht zu bringen.

Fig. 52 S. 154 zeigt die Anordnung der Hughesschen Induktionswage. Es wird hierbei ein Telephon T in den Stromkreis zweier Induktionsrollen a und a′ gebracht, die derart angeordnet sind, daß ihre Ströme entgegengesetzte Richtung haben. A und A′ sind die mit einer Batterie B verbundenen induzierenden Rollen, in deren Stromkreis die auf den Enden einer Stange festsitzenden Rollen C und C′

eingeschaltet sind. Auf dieser Stange ist die mit den Induktionsrollen a und a′, sowie mit dem Telephon T verbundene Rolle D verschiebbar. Wird zwischen die Rollen A und a irgend ein leitender Körper L gebracht, so wird das vorher hergestellte Gleichgewicht des Apparates gestört, was durch das Summen des Telephons erkennbar ist. Die Rolle D wird dann durch Verschiebung auf der mit Teilung versehenen Stange so eingestellt, daß das Telephon zur Ruhe kommt, was als Zeichen des wiederhergestellten Gleichgewichtes dient.

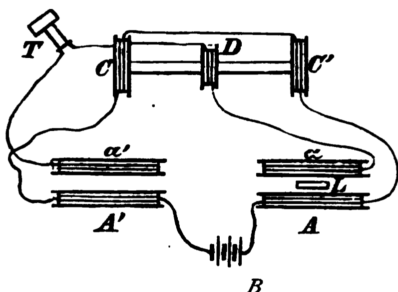


Fig. 52.

Die mit dem Telephon verbundene Induktionswage ist ein äußerst empfindlicher Apparat, mit dem sich die geringsten Unterschiede im Gleichgewicht des physikalischen Zustandes, der materiellen Zusammensetzung, der Homogenität, sowie der Temperatur zweier leitender Körper von gleichen Abmessungen, etwa zweier Münzen und dergleichen, bestimmen lassen, sobald man dieselben genau unter denselben Bedingungen den beiden Rollensystemen gegenüberstellt.

Neunzehntes Kapitel.

Die Messung elektrischer Stromstärken und Potentialdifferenzen.

86. Allgemeine Bemerkungen. — Zur Messung von Stromstärken und Potentialdifferenzen wird meist die magnetische Wirkung des Stromes benutzt, indem man den durch Drahtwindungen geführten Strom auf einen beweglichen Magnet einwirken läßt. Ferner benutzt man aber auch den thermischen Effekt des Stromes, um mittels Ausdehnung eines Metallfadens einen Zeiger in Bewegung zu setzen. Die elektrolytischen Meßmethoden, welche auf der Gewichtsbestimmung des durch den Strom bewirkten Metallniederschlages beruht, hat sich in der Praxis nicht bewährt.

Will man mittels der Stromwirkung zwei elektromotorische Kräfte oder Spannungen (Potentialdifferenzen) vergleichen, so hat man nach dem Ohmschen Gesetz

$$\frac{E_1}{E} = \frac{I_1 r_1}{I r}.$$

Ordnet man den Apparat so an, daß die Stromstärken oder die Widerstände gleich sind, so erhält man das Verhältnis der elektromotorischen Kräfte gleich dem Verhältnis der Stromstärken bezw. gleich dem Verhältnis der Widerstände. Die Spannungs- oder Voltmesser unterscheiden sich daher von den Strom- oder Ampèremessern nur dadurch, daß bei ersteren dem Strome ein hoher Widerstand in Form einer Drahtspule aus dünnem Drahte von großer Länge entgegengesetzt wird, während bei letzteren der Widerstand im allgemeinen gering und zwar um so geringer ist, je stärkere Ströme zu messen sind.

87. Die Galvanometer. — Unter dieser Bezeichnung versteht man im allgemeinen Apparate, die zur Strommessung dienen, im besonderen aber hat man darunter Apparate zu verstehen, bei denen unter der Wirkung des Stromes eine Magnetnadel oder ein beweglicher Magnet eine Drehung erhält,

um aus dieser Drehung auf die Stromstärke zu schließen. Um langdauernde Schwingungen des beweglichen Magnets zu vermeiden, ist der Magnet mit einer Kupfermasse umgeben, in welcher durch Induktion Ströme zur Dämpfung der Nadelbewegung erregt werden, oder es ist zu gleichem Zweck ein permanenter Magnet angebracht.

Um die Galvanometer vor der Einwirkung zu starker Ströme zu schützen, werden dieselben in der Regel nicht direkt in den Hauptstromkreis, sondern in einen Nebenschluß mit einem gewissen, den Verhältnissen angemessenen Widerstande (shunt) eingeschaltet, um die Ablenkungswinkel in einem gewissen Verhältnis zu verkleinern, weil zu große Ausschlagwinkel der Nadel zu ungenauen Ablesungen führen. Will man z. B. den Strom, der durch das Galvanometer gesendet werden soll, auf den Bruchwert von $\frac{1}{n}$ abschwächen, so muß dem Galvanometer ein Nebenschlußwiderstand vorgeschaltet werden, der (mit dem Widerstande des Instrumentes zusammen genommen) nur $\frac{1}{n}$ des zu messenden Stromes durch das Galvanometer hindurchgehen läßt. Ist V die Potentialdifferenz, die der Nebenschluß auf die Klemmen des Galvanometers überträgt, und sind ferner r_1 und r_2 beziehungsweise die Widerstände des Nebenschlusses und des Galvanometers, so wie i_1 und i_2 beziehungsweise die durch diese Widerstände hindurchgehenden Stromstärken, so hat man nach dem Ohmschen Gesetz

$$i_1 = \frac{V}{r_1} \text{ und } i_2 = \frac{V}{r_2},$$

folglich

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Es verhalten sich also die Stromstärken im Galvanometer und Nebenschluß umgekehrt wie die entsprechenden

Stromstärken. Da aber nur $\frac{1}{n}$ des Hauptstromes durch das Galvanometer gehen soll, so muß 1 Teil dieses Strombruchteils vom Widerstande des Galvanometers und $\frac{1}{n^{-1}}$ vom Widerstande des Nebenschlusses aufgenommen werden, woraus folgt:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{n^{-1}},$$

woraus für den Widerstand des Nebenschlusses folgt:

$$r_1 = \frac{r_2}{n^{-1}}.$$

Gewöhnlich sind die Nebenschlußwiderstände derart normiert, daß sie den Hauptstrom um $^1/_{10}$, $^1/_{100}$ und $^1/_{1000}$ und die entsprechenden Widerstände (shunts) sind also

$$\frac{r_2}{9}, \frac{r_2}{99}, \frac{r_2}{999}.$$

Der Widerstand r des im Nebenschluß eingeschalteten Galvanometers hat also den Wert:

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Die Benutzung der Galvanometer beruht auf der Beobachtung von Schwingungen, deren Umstände durch die Zeitpunkte der aufeinanderfolgenden Nadelausschläge und deren Größe bestimmt sind. Diese Bewegung wird beobachtet entweder durch das Spiel eines Zeigers vor einem geteilten Kreisbogen, oder durch das Bild einer im Focus eines Fernrohres vor einem Mikrometer befindlichen Linie oder durch das Bild einer Skalenteilung auf dem Fadenkreuz eines Fernrohres*). Wird zur Beobachtung der Schwingung

---

*) Vergl. Mascart-Joubert, „Elektrizität und Magnetismus". 2. Bd. „Messung von Schwingungen".

das Spiel eines Zeigers vor einem geteilten Kreisbogen benutzt, so erfolgt die Ablesung des Ausschlagwinkels direkt. Um den Ausschlagwinkel bis zu einer Minute genügend genau ablesen zu können, muß der Teilkreis wenigstens 16 cm Durchmesser haben; ferner muß der Zeiger möglichst nahe an der Skala spielen, damit nicht durch schiefes Sehen (Eintreten der Parallaxe) fehlerhaftes Ablesen entsteht. Um dies zu vermeiden, bringt man wohl die Teilung auf Spiegelglas an und visiert mit einem Auge die Zeigerspitze so, daß sie ihr Spiegelbild genau überdeckt. Ein sehr genaues Ablesen ergiebt sich durch Anwendung der Spiegelmethode. Dieselbe beruht darauf, daß mit dem um eine vertikale Achse schwingenden System des Meßinstrumentes ein kleiner Spiegel verbunden wird, wobei entweder mittels eines kleinen Fernrohrs das Spiegelbild der Skala, oder die Bewegung eines vom Spiegel auf die Skala reflektierten Lichtstreifens beobachtet wird.

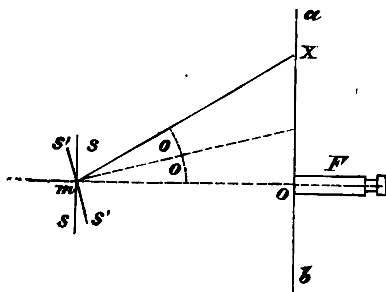


Fig. 53.

Fig. 53 illustriert die ersterwähnte Messungsweise. Der um eine vertikale Achse sich drehende Spiegel s s ist so mit dem schwingenden System des Galvanometers verbunden, daß derselbe um den Schwingungswinkel gedreht wird und

somit beispielsweise aus seiner mittleren Ruhelage s s in die Lage s′ s′ gelangt, wodurch im Fernrohr F der Teilpunkt x der Skala a b vom Fadenkreuz gedeckt wird. Ist o c = d die Entfernung der geraden Skala vom Spiegel und die Entfernung o x des Teilpunktes x vom Nullpunkte der Skala gleich l, während der Winkel o c x nach dem Gesetz der Reflexion gleich dem doppelten Einfallswinkel a gesetzt wird, so ist

$$\tan 2a = \frac{l}{d}$$

und der Winkel a entspricht demnach dem Ausschlagwinkel des Galvanometers.

88. Die für Galvanometer geltenden Schwingungsgesetze. — Wenn ein materielles System um eine Achse schwingt, so ist dasselbe der Einwirkung eines Kräftepaares unterworfen, durch welches eine Ablenkung des Systems aus seiner Gleichgewichtslage angestrebt wird. Das Moment dieses Kräftepaares wird bestimmt durch den Ausschlagwinkel, durch die aus der Bewegung hervorgehenden verzögernden Wirkungen und durch die Ausschlagsgeschwindigkeit. Wenn die verzögernden Kräfte Null sind, so wird die Bewegung periodisch genannt und alle Schwingungen sind einander gleich. Im entgegengesetzten Falle ist die Bewegung gedämpft oder aperiodisch.

Mit Ausschlag- oder Elongationswinkel bezeichnet man die Stellung des schwingenden Systems, bei der dasselbe die größte Ablenkung von seiner Gleichgewichtslage erfährt, und Amplitude ist der durch zwei größte Ablenkungen begrenzte Winkel.

Die Dauer einer einfachen Schwingung (Oscillationsdauer) ist die Zeit, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden, entgegengesetzt zur Mittellage stattfindenden Ausschlägen verfließt, und unter einer Schwingungsperiode versteht man die Zeit, welche zwischen zwei im gleichen Sinne

stattfindenden Ausschlägen vergeht. Die Schwingungsperiode ist daher gleich der zweifachen Oscillationsdauer.

Je nach Umständen ist das die Ablenkung bewirkende Kräftepaar dem Ausschlagwinkel oder dem Sinus des Ausschlagwinkels proportional. Im ersten Falle erfolgen die Schwingungen isochron, im zweiten Falle entsprechen sie Pendelschwingungen.

Bei den isochronen Schwingungen ist die Zeit t der einfachen Schwingung unabhängig von der Amplitude und bestimmt durch die Gleichung

$$t = \pi \sqrt{\frac{T\alpha}{K}}.$$

In dieser Gleichung bezeichnet T das Trägheitsmoment des schwingenden Systems in Bezug auf die Schwingungsachse, α den Ausschlagwinkel im Verhältnis des Bogens zum Radius (in Radians) und K das entsprechende, die Ablenkung bewirkende Kräftepaar in Ergs.

Bei der Pendelschwingung können nur sehr kleine Ausschlagwinkel als isochron gelten. Mit Zunahme der Amplitude tritt eine Vergrößerung der Oscillationsdauer ein, die jedoch bis zu Ausschlagwinkeln von 10° so gering ist, daß man sie in der Praxis vernachlässigen und die Ausschlagwinkel als isochron ansehen kann.

Aus der oben gegebenen Gleichung für die Zeit der isochronen Schwingungen läßt sich die Gleichung für das einfache theoretische Pendel ableiten, bei welchem vorausgesetzt ist, daß die schwingende Masse an einem gewichtslosen unausdehnbaren Faden hängt; die Länge dieses Fadens vom Aufhängepunkt bis zum Schwerpunkt der schwingenden Masse M gleich l und das Gewicht dieser Masse gleich M g gesetzt, ergiebt

$$T = M\,l^2 \text{ und } K = M\,g\,l \sin \alpha,$$

woraus folgt:

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Diese für isochrone Pendelschwingungen gültige Formel läßt sich für magnetische Messungen, sowie zur Bestimmung des Torsions-Kräftepaares bei der Aufhängung an einem oder an zwei parallelen Fäden (unifilare und bifilare Aufhängung) benutzen.

89. **Galvanometer mit beweglichem Magnet.** — Haupttypen der Galvanometer sind: die Sinusbussole, die Tangentenbussole und deren Kombination: die Sinus-Tangentenbussole; ferner die gewöhnlichen Galvanometer und die Differentialgalvanometer.

Die Sinusbussole. Dieses von Pouillet 1836 vorgeschlagene Instrument besteht aus einem um seinen Vertikaldurchmesser drehbaren Drahtring, in dessen Mitte die Nadel horizontalschwebend auf einer Spitze ruht. Bei der Benutzung zur Messung verschiedener Stromstärken kann man mittels eines mit der Nadel verbundenen Zeigers oder eines an der Nadel angebrachten, mit einer Marke versehenen und vor dem Teilkreis sich bewegenden Elfenbeinplättchens die relative Lage der Nadel zur Vertikalebene des Drahtringes genau kontrollieren. Nachdem zu Anfang des Versuches der Drahtring parallel zur Nadel und zu dem magnetischen Meridian eingestellt worden ist, wird der zu messende Strom durch den Drahtring gesendet, wodurch die Nadel eine entsprechende Ablenkung erfährt. Hierauf wird der Drahtring im Sinne der Nadelablenkung gedreht, bis er wieder parallel zur Nadel eingestellt ist. Alsdann befindet sich die Nadel unter der Einwirkung zweier Kräftepaare im Gleichgewicht, von denen das eine Paar von dem zu messenden Strome, das andere Paar vom Erdmagnetismus herrührt. Ist α der Drehungswinkel des Drahtringes, r sein Halbmesser und n die Zahl der Drahtwindungen, sowie H die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus, so besteht für die Stromstärke I die Gleichung:

$$I = \frac{r\,H}{2\,\pi\,n} \sin \alpha.$$

Die mit dem Instrument zu messende größte Stromstärke ergiebt sich für $a = 90^\circ$, wo alsdann in dieser Gleichung $\sin a = 1$ zu setzen ist.

Die Tangentenbussole. Von der Sinusbussole unterscheidet sich die ebenfalls von Pouillet konstruierte Tangentenbussole dadurch, daß ihr vertikaler, vom Strom durchflossener, auf die horizontal in seiner Mitte schwebende Nadel ablenkend einwirkender Drahtring nicht drehbar, sondern fest ist, wodurch die Konstruktion vereinfacht wird. Bei dieser Einrichtung des Galvanometers werden die die Nadel ablenkenden Stromstärken durch die Tangenten der Ablenkungswinkel gemessen, indem die wirksamen Stromstärken den Tangenten dieser Winkel proportional sind. Damit aber diese Bedingung so nahezu als möglich erfüllt werde, ist vorausgesetzt, daß der vertikale Drahtring einen möglichst großen Durchmesser habe, die in seiner Mitte schwebende horizontale Magnetnadel verhältnismäßig klein und die Ablenkungen gering seien. Der letztere Umstand macht es ratsam, die Ablenkungen mittels der Reflektionsmethode abzulesen, wozu auf der Nadel ein kleiner vertikaler Spiegel zu befestigen ist, doch bedient man sich auch zur Vergrößerung der Ablenkungsbogen eines mit der Nadel verbundenen Aluminiumzeigers.

Ist r der Halbmesser des Drahtringes, N die Zahl von dessen Drahtwindungen, H die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus und a der vom Strome I verursachte Ablenkungswinkel, so gilt für die Tangentenbussole die Gleichung:

$$I = \frac{r\,H}{2\pi N} \tan a.$$

Gewöhnlich giebt man der Gleichung die Form:

$$I = C \tan a$$

und bezeichnet C als die Konstante des Instrumentes. Dies gilt beziehungsweise auch für die Sinusbussole. Diese Konstante wird bestimmt, indem man einen Strom von bekannter Stärke durch den Drahtring gehen läßt.

Wäre bei der Tangentenbussole das auf die Nadel einwirkende Magnetfeld gleichförmig, oder die Nadel unendlich klein, so würde sich die elektromagnetische Wirkung auf ein Kräftepaar beschränken und die obige Gleichung lieferte absolut richtige Werte. Da aber weder die eine noch die andere Bedingung streng erfüllt ist, so wird folglich im allgemeinen neben dem Kräftepaare noch eine Einzelkraft wirksam sein, worunter die Richtigkeit der Angaben des Instrumentes leidet, sobald die Empfindlichkeit des Instrumentes eine gewisse Grenze überschreitet. Man giebt deshalb für die Ausführung genauer Messungen dem Instrumente eine geringere Empfindlichkeit, indem man für den Drahtring einen möglichst großen Durchmesser wählt, oder denselben mit nur wenig Drahtwindungen umgiebt, wodurch die Ablenkungen der in diesem Falle meist an einem Faden aufgehängten, anstatt auf einer Spitze balancierten Nadel sehr klein ausfallen.

Um den erwähnten Fehler zu beseitigen und die Nadel nur der Einwirkung eines Kräftepaares auszusetzen, hat Gaugain eine konische Bewickelung des Ringes in Anwendung gebracht und den Ring so zur Seite gestellt, daß der Mittelpunkt der Nadel im Scheitel des Ergänzungskegels der Drahtwickelung sich befindet.

Als Kombination der beiden im Vorstehenden beschriebenen Instrumente tritt die Sinus-Tangentenbussole auf. Dieselbe dient für Messungen sowohl nach dem Sinus- als auch nach dem Tangentengesetz. Bei dem von Siemens & Halske gebauten Instrument ist der Drahtring mit dem Nadelgehäuse in einem auf drei Stellschrauben ruhenden Teilkreisringe drehbar. Für Sinusmessungen dient ein Drahtring von vielen Windungen und eine lange Nadel; für Tangentenmessungen ein Drahtring von wenigen Windungen und eine kurze Nadel.

Fig. 54 S. 164 zeigt eine Anordnung der Tangentenbussole, welche im englischen Post- und Telegraphendienst zur Prüfung der galvanischen Elemente,

der Drähte und der Apparate eingeführt worden ist; dieselbe ist tragbar und sehr empfindlich. Die Konstante des Instruments ist 0.00214, d. h. es bedarf einer Intensität von

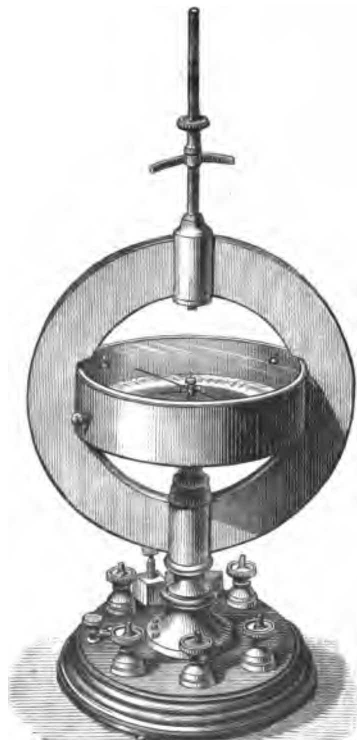


Fig. 54.

0.00214 Ampères, um eine Abweichung von 45° herbeizuführen. Fig. 55 zeigt die Anordnung der Spiralen und der Verbindungen. Der Ring, auf welchen drei

Spiralen gewickelt sind, hat einen Durchmesser von 20.3 cm. Die der Nadel zunächst befindliche Spirale besteht aus Draht Nr. 35 der Birminghamer Drahtlehre und ihr Widerstand beträgt 320 Ohms. Die beiden anderen Spiralen bestehen aus Draht Nr 18; diejenige zwischen C und D macht drei Windungen, während diejenige zwischen D und E zwölf Windungen in umgekehrter Richtung macht. Die letztere Spirale dient zur Untersuchung der Elemente, und indem man beziehentlich die Klemmen CD, DE und CE benutzt, kann man bezügliche Empfindlichkeitsgrade erhalten, welche angenähert den Zahlen 1, 3 und 4 entsprechen.

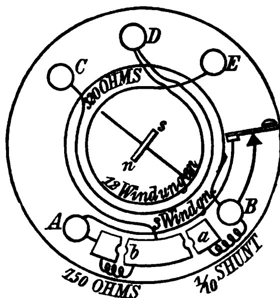


Fig. 55.

Im oberen Teil des Bussolenringes ist ein Reguliermagnet angebracht. Um die Stromstärken in Milli-Ampère zu messen, wird ein Daniell-Element mit den Klemmen A und B verbunden (Fig. 55). Indem man die Rheostatenstöpsel aus den Löchern a und b zieht, wird ein Gesamtwiderstand von 1070, das ist von (750 + 320) Ohms, hergestellt. Da die elektromotorische Kraft des Normalelements 1.07 Volt beträgt, so entspricht die Abweichung der Galvanometernadel von 30° einer Stromstärke von 1 Milli-Ampère. Mittels des Reguliermagnets kann diese Abweichung beliebig vergrößert oder verkleinert werden. In der Praxis wird der Apparat so reguliert, daß auf der gewöhnlichen Skala eine Abweichung von 80° für ein Milli-Ampère stattfindet. Um einen Strom zu messen steckt man gewöhnlich den Stöpsel a ein, um den Widerstand von 750 Ohms auszuschalten. Dieser Stöpsel schaltet einen Nebenschluß von 0.1 ein. Bisher war das Zifferblatt mit zwei Skalen, die eine in Grade, die andere in Tangenten eingeteilt, versehen,

und um die Fehler der Parallaxe zu vermeiden, wurde die Nadel in einem Spiegel derartig reflektiert, daß, wenn Bild und Nadel in derselben Linie sich befanden, kein Fehler in der erwähnten Beziehung eintreten konnte. Neuerdings ist das Instrument so eingerichtet worden, daß seine Empfindlichkeit mit der Stromverstärkung für größere Abweichungen verstärkt wird, indem ihm ein falscher Nullpunkt gegeben ist. In der That kann die Empfindlichkeit des Apparates verdoppelt werden, wenn derselbe so gestellt wird, daß die Ringebene mit dem Meridian einen Winkel von 60° einschließt.

Galvanometer mit astatischer Nadel von Siemens & Halske (Fig. 56). Um die Wirkung des Erdmagnetismus auf die Nadel möglichst zu beseitigen ist dieselbe (nach Nobilis Vorgange) astatisch gemacht, d. h. es sind zwei Magnetnadeln von gleicher Stärke und Größe durch einen dünnen Messing- oder Aluminiumdraht in umgekehrter Richtung mit einander verbunden, so daß die Kraft, die die eine Nadel in den magnetischen Erdmeridian zu stellen strebt, von dem auf die andere Nadel einwirkenden Erdmagnetismus genau im Gleichgewicht gehalten wird. Dieses astatische Nadelpaar ist an einem Coconfaden innerhalb eines Glasgehäuses aufgehängt, so daß die untere Nadel innerhalb zweier neben einander aufgestellten, mit Draht bewickelten und die wirksame Drahtrolle bildenden Rahmen, die andere Nadel über einer die Drahtrahmen bedeckenden und mit dem Teilkreise versehenen Messingplatte spielt.

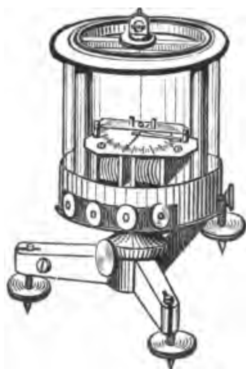
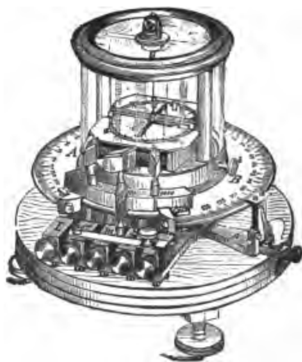


Fig. 56.

Das Differentialgalvanometer. Das vorhergehende Instrument kann auch (nach Becquerels Vorgange) als Differentialgalvanometer benutzt werden, wenn man die

beiden Drahtrahmen in entgegengesetzten Richtungen auf die eine Nadel einwirken läßt. Die durch die beiden Drahtrahmen gesendeten Ströme können entweder von einander unabhängig sein oder auch zwei Zweige desselben Stromkreises bilden. Werden zwei gleiche Ströme in entgegengesetzten Richtungen durch diese Drahtbewickelungen gesendet, so bewegt sich die Nadel nicht. Sind die Ströme aber ungleich, so wird die Nadel durch den stärkeren Strom abgelenkt und zwar mit einer Kraft, die der Differenz der beiden Stromstärken entspricht. Die Messung beruht darauf, daß die Stärke des einen Stromes bezw. durch Ein- oder Ausschalten von Widerständen so zu ändern ist, daß die Nadel auf den Nullpunkt gebracht wird.

Universalgalvanometer von Siemens & Halske (Fig. 57). Dasselbe ist mit einer an einem Coconfaden hängenden astatischen Nadel versehen und kann nicht nur zur Messung von Stromstärken, sondern auch zur Messung elektromotorischer Kräfte und Widerstände, das ist: zur Messung der drei sogenannten Konstanten benutzt werden.


Fig. 57.

Das sehr empfindlich eingerichtete Galvanometer kann auf seinem Dreifuß in horizontaler Ebene gedreht werden und ist mit einer Wheatstoneschen Brücke (s. d.) und den erforderlichen Widerständen vereinigt.

Zur Messung von Stromstärken wird das Instrument als Sinusbussole benutzt, wobei seine Empfindlichkeit durch passende Nebenschließungen auf das erforderliche Maß verringert wird.

Die Benutzung des Instrumentes zur Messung elektromotorischer Kräfte und Widerstände wird in den betreffenden Kapiteln besprochen werden.

Torsionsgalvanometer von Siemens & Halske (Fig. 58). Dieses weitverbreitete vorzügliche Instrument wird hauptsächlich zur Messung von Stromstärken und Spannungsdifferenzen bei Batterien und Dynamomaschinen gebraucht; da aber auch alle übrigen elektrischen Größen aus Stromstärke- und Spannungsdifferenz berechnet werden können, so läßt sich dieses Instrument für alle in diesen Bereich gehörige elektrische Größen benutzen.

Seiner Einrichtung nach besteht dieses Galvanometer aus einem zwischen zwei vom Strome durchflossenen rahmenartigen Drahtspulen hängenden sogenannten Glockenmagnet, der aus einem hohlen unten offenen und bis nahe an sein geschlossenes oberes Ende mit zwei diametral gegenüberstehenden Schlitzen versehenen Stahlcylinder besteht und in seiner magnetischen Wirkung einem Hufeisenmagnete entspricht, jedoch verhältnismäßig stärkere magnetische Wirkung ausübt als ein solcher. Dieser Glockenmagnet hängt an einem Coconfaden und einer Spiralfeder, die mittels eines über die mit Kreisteilung versehene Glasscheibe des Gehäusedeckels vorstehenden Knopfes durch Drehung entgegengesetzt zur Ablenkung des Magnets torsiert werden kann, um den Magnet in seine Anfangsstellung auf Null zurückzubringen. Diese Torsion wird mittels eines mit der Feder verbundenen Zeigers an der Kreisteilung des Glasdeckels abgelesen und der Torsionswinkel der Spiralfeder ist proportional der Stärke des durch das Galvanometer fließenden

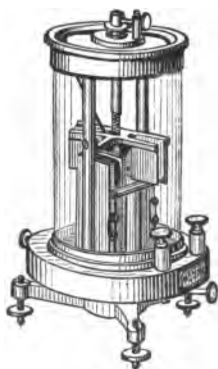


Fig. 58.

Stromes, also auch, da der Widerstand des Galvanometers eine konstante Größe ist, proportional der an den Enden des Galvanometerdrahtes herrschenden Spannungsdifferenz (Potentialdifferenz). Die Schwingungen des Magnets werden durch ein Glimmerflügelrädchen rasch gedämpft und zum Stillstand gebracht.

Um die in irgend einem Stromkreise herrschende Stromstärke zu bestimmen, wird das Torsionsgalvanometer g (Fig. 59) mit einem Nebenschluß n versehen und mit demselben in den Stromkreis ss eingeschaltet. Der Nebenschluß wird so gewählt, daß der Zweigwiderstand W W in dekadischem Verhältnis steht zu dem Widerstande des Galvanometers. Die Messung ergiebt alsdann unmittelbar die zur Zeit im Hauptstromkreise ss herrschende Stromstärke in Ampères.

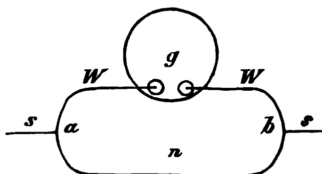


Fig. 59.

Wenn z. B. das Torsionsgalvanometer 1 Ohm Widerstand hat und so justiert ist, daß 1° der Torsionswinkel gleich 0.001 Volt Spannungsdifferenz an den Galvanometerklemmen ist, so entspricht auch ein Torsionswinkel von 1° der Stromstärke:

$$\frac{0.001 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}} = 0.001 \text{ Ampère}$$

im Galvanometer. Schaltet man einen Nebenschluß n von 1/99 Ohm parallel zum Instrument, so ist der Widerstand dieser Verzweigung:

$$\frac{1}{99 + 1} = \frac{1}{100} \text{ Ohm.}$$

Schaltet man nun das Instrument mit diesem Nebenschluß in irgend einen Stromkreis ss ein und erhält z. B. durch Zurückbringung des Magnetausschlags in die

Nullstellung mittels Drehung der Feder einen Ausschlag bezw. Torsionswinkel von 102°, so ist die Spannungsdifferenz an den Enden der Stromverzweigung (zwischen a und b in Fig. 59): 102 × 0.001 = 0.102 Volt, also die Summe der Ströme in den beiden Zweigen des Nebenschlusses

$$\frac{0.102 \text{ Volt}}{0.01 \text{ Ohm}} = 10.2 \text{ Ampères.}$$

Dies ist aber auch die Stärke des Stromes im Hauptstromkreise, in den das Instrument mittels des Nebenschlusses eingeschaltet ist.

Um die elektrische Spannung (Potentialdifferenz) zwischen zwei Punkten a und b eines Stromkreises (Fig. 60) zu

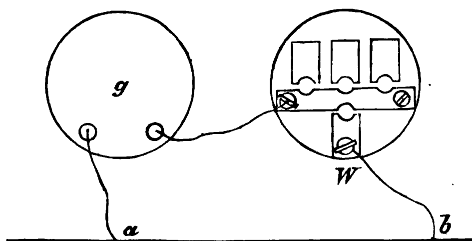


Fig. 60.

messen, schaltet man zu dem Torsionsgalvanometer g einen Widerstand W und legt die beiden Enden des aus diesen beiden Apparaten bestehenden Zweiges an die Punkte a und b an; der vorgeschaltete Widerstand wird so gewählt, daß die Summe desselben und des Galvanometerwiderstandes in dekadischem Verhältnis steht zu dem Widerstande des Instruments. Die Messung ergiebt dann unmittelbar die zur Zeit der Messung herrschende Spannungsdifferenz (Potentialdifferenz) in Volts.

Es betrage z. B. der vorgeschaltete Widerstand 900 Ohm, der Widerstand des Galvanometers 100 Ohm, so ist die

Summe beider Widerstände gleich 1000 Ohm. Ferner sei das Instrument so justiert, daß 1° = 0.01 Volt (an den Galvanometerklemmen), so entspricht 1° des Ausschlags (der Torsion) einer Spannungsdifferenz von $0.01 \times \frac{1000}{100} = 0.1$ Volt an den Enden des Meßzweiges, der aus Galvanometer + Widerstand zusammengesetzt ist. Schaltet man also diesen Meßzweig ab zwischen zwei Punkte eines Maschinenstromkreises und erhält man dabei die Ablesung 76°, so ist die Spannungsdifferenz zwischen a und b gleich $76 \times 0.1 = 7.6$ Volt.

Sind die Verhältnisse des Hauptstromkreises derartig, daß die Spannungsdifferenz zwischen a und b durch das Anlegen der das Galvanometer enthaltenden Abzweigung nicht merklich geändert wird, so giebt die gemessene Spannungsdifferenz zugleich diejenige des Hauptstromkreises, welche ohne das Anlegen des Meßzweiges geherrscht haben würde. Dies ist der Fall, wenn der durch den Meßzweig gehende Strom nur einen verschwindenden Teil des Hauptstromes ausmacht, was bei Messungen an elektrischen Maschinen stets der Fall ist.

Das aperiodische Spiegelgalvanometer der Firma Siemens & Halske.

Um die langdauernden Schwingungen der Galvanometernadel zu vermeiden, wodurch bei den Messungen viel Zeit verloren geht, bevor die die Ablenkung messende Gleichgewichtsstellung erreicht wird, dämpft man die Schwingungen und sucht so das Instrument mehr oder minder aperiodisch zu machen, indem man den schwingenden, als Nadel oder als Glocke ausgebildeten Magnet in einem Kupfergehäuse schweben oder einen Richtungsmagnet darauf einwirken läßt. In ersterer Weise ist das aperiodische Spiegelgalvanometer der Firma Siemens & Halske (Fig. 61 S. 172) eingerichtet. Dasselbe ist mit zwei Drahtrollen von ungefähr 3000 S.-E. (Siemens-Einheiten) Widerstand versehen und

der Glockenmagnet schwebt an einem Coconfaden in einer Kupferkugel, so daß also hierbei kein Richtmagnet angewendet wird. Spiegel und horizontales Cylindergehäuse sind hierbei nach allen Richtungen hin auf einem Dreifuß drehbar.

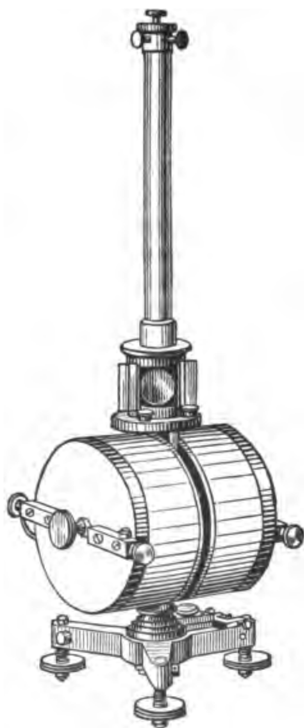


Fig. 61.

Torsions-Spiegelgalvanometer von Marcel-Deprez nach d'Arsonvals Konstruktion modifiziert (Fig. 62). Es ist hier anstatt der Nadel zwischen zwei oben und unten befestigten feinen Drähten ein mit Draht bewickelter Rahmen angebracht, worin sich zur Verstärkung des Magnetfeldes eine hohlcylindrische Eisenmasse befindet. Der so hergestellte schwebende Anker befindet sich zwischen den passend ausgehöhlten Polschuhen zweier Elektromagnete, deren magnetisches Feld durch eine konstante Elektrizitätsquelle von bekannter Wirkung erregt werden kann, während der zu messende Strom mittels der beiden mittleren der vier vorhandenen Klemmen, welche mittleren beiden Klemmen mit Drähten der schwebenden Anker verbunden sind, durch die Armaturbewickelung geleitet wird. Oberhalb des Ankers befindet sich der zur Ablesung der Ablenkung dienende kleine kreisrunde

Spiegel. Es ist dieses Galvanometer ebenfalls aperiodisch, d. h. der als Nadel dienende polarisierte Anker schwingt nicht hin und her, sondern unterliegt unter Einwirkung

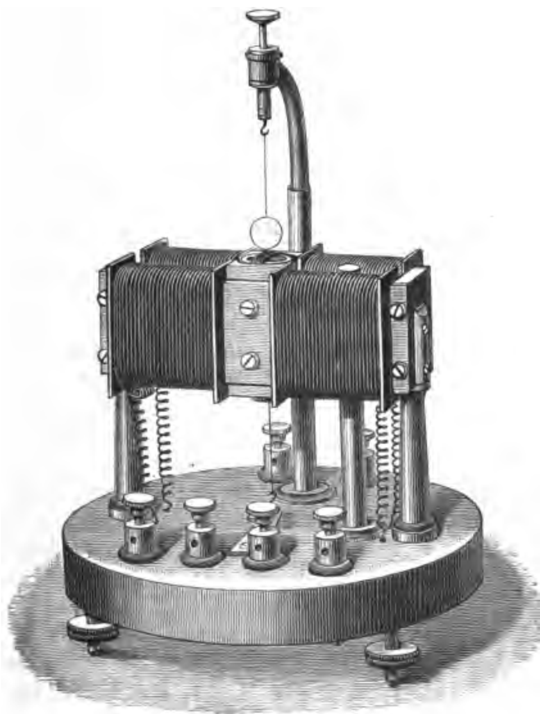


Fig. 62.

des Stromes einer einfachen, der Stromstärke entsprechenden mehr oder minder großen Drehung. Der Rahmen des Ankers ist mit 285 Drahtwindungen bewickelt, die einem Widerstand von 123 Ohm entsprechen. Die Elektromagnete

sind mit Draht von 1 mm Dicke in sechs Lagen, jede von 248 Windungen, bewickelt. Der Gesamtwiderstand derselben ist, bei Hintereinanderschaltung, gleich 2.48 Ohm. Es wird dieses Galvanometer besonders zur Messung von Widerständen mittels der Wheatstoneschen Brücke, ferner zur Messung elektromotorischer Kräfte, sowie zu Strommessungen empfohlen, wozu selbstverständlich auch die vorher beschriebenen Galvanometer, insbesondere das Universalgalvanometer, zu benutzen sind.

Das aperiodische Universalgalvanometer von d'Arsonval-Wiedemann ist ähnlich wie das durch Fig. 62 dargestellte eingerichtet; dasselbe ist eine Tangentenbussole mit beweglichen Spulen, die auf einer horizontalen geteilten Schiene zu beiden Seiten eines schwebenden Hufeisenmagnets verschiebbar und nach der Teilung so einzustellen sind, daß ein astatisches Galvanometer (ähnlich dem Thomsonschen) gebildet wird. Der den schwebenden kleinen glockenförmigen Hufeisenmagnet tragende Teil ist, ähnlich wie beim Spiegelgalvanometer Fig. 61, unabhängig von der Grundplatte, auf der die geteilte, die Spulen tragende Schiene befestigt ist. Der an einem Coconfaden hängende Hufeisenmagnet schwebt innerhalb einer mit dem oberen, abnehmbaren Teile des Gestells fest verbundenen kupfernen Hohlkugel. An dem den Coconfaden umgebenden vertikalen Rohre (vergl. Fig. 61) ist ein kugelförmiger Magnet, der als Dämpfer dient, verschiebbar, um seine auf den schwebenden Magnet ausgeübte richtende Wirkung leicht regeln zu können.

Das Instrument vereinigt in sich die drei Hauptformen des Galvanometers, indem es sich durch Auswechselung seiner Teile auch leicht in ein Thomsonsches astatisches Galvanometer umwandeln läßt. Die Empfindlichkeit ist durch horizontale Verschiebung der Spulen leicht zu regeln und es läßt sich dadurch auch ein Differentialgalvanometer ohne weiteres herstellen.

Das Thomsonsche astatische Galvanometer. Die Konstruktion ist derartig getroffen, daß so viel als möglich

die theoretischen Bedingungen erfüllt werden. Die Nadel besteht aus einem dünnen Stahlstreifen von etwa 8 mm Länge; dieser Streifen ist auf der Rückseite des zur Ablesung bestimmten Spiegels aufgeklebt. Statt eines Streifens werden aber auch vier oder fünf parallele benutzt, doch muß das Gesamtgewicht von Spiegel und Nadel möglichst gering gehalten werden. In guten Instrumenten beträgt dasselbe etwa 0.5 g. Dieses System hängt an einem Coconfaden von etwa 1 cm Länge und befindet sich in einer Höhlung von rechteckigem Querschnitt, die nur so groß ist, daß der Nadel ein kleiner Ausschlag nach beiden Seiten gestattet ist. Die Induktionsströme wirken infolge der Kleinheit der Nadel, ihres Abstandes von der Rolle und des gewöhnlichen großen Drahtwiderstandes nur in geringem Grade auf die Nadel ein. Die Rolle hat einen kreisförmigen Querschnitt und der Achsenschnitt der Windungsmasse bildet ein Rechteck, das um die theoretisch bestimmte Kurve der besten Wickelung gelegt ist.

90. Balistische Galvanometer. — Bei einem sehr kurz dauernden Strom wird die Nadel des Galvanometers durch einen Impuls aus ihrer Lage gestoßen und somit in Schwingung versetzt. Ist Q die das balistische Galvanometer durchlaufende Elektrizitätsmenge, T die Zeit der Schwingungsperiode der Nadel, das ist die Zeit einer Doppelschwingung, I die Stromstärke, welche einen Ausschlagwinkel α der Nadel hervorruft, und ε der Ausschlag, so gilt die Gleichung

$$Q = \frac{T}{\pi} I \frac{\sin\frac{\varepsilon}{2}}{\operatorname{tang}\alpha}.$$

Bei schwachem Ausschlag liest man α und ε direkt an der Skala ab und benutzt die Gleichung

$$Q = \frac{T I \varepsilon}{2\pi\alpha}.$$

91. Thermische Voltmeter. — Die Zeigerbewegung wird bei diesen Instrumenten durch die Ausdehnung eines vom zu messenden Strome durchlaufenen, dadurch erwärmten und infolgedessen sich ausdehnenden und den Zeiger bewegenden Drahts bewirkt. Das bekannteste Instrument dieser Art ist das Cardewsche Voltmeter. Im Prinzip besteht der Apparat aus einem Platin-Silberfaden, von etwa 0.063 mm Durchmesser, der in ein Messingrohr eingeschlossen ist. Die Potentialdifferenz wirkt auf die Enden dieses Metallfadens ein, so daß dieser durch den zu messenden Strom erwärmt wird; dadurch dehnt sich der Metallfaden entsprechend aus und bewirkt die Drehung eines Zeigers. Es können damit die Potentiale nicht nur von Gleichströmen, sondern auch von Wechselströmen gemessen werden.

92. Voltameter. — Die Voltameter sind auf das Faradaysche Gesetz der Elektrolyse begründet, wonach die von einem elektrischen Strom hervorgebrachte Wirkung der dem Strome entsprechenden Energiemenge proportional ist. Daher ergiebt sich die zu messende konstante Stromstärke aus dem Verhältnis der zersetzten Menge eines Elektrolyts zu der während der Zersetzung verflossenen Zeit. Ist die Stromstärke nicht konstant, so wird auf diese Weise die mittlere Stromstärke bestimmt. Man unterscheidet Volumenvoltameter und Gewichtsvoltameter.

Als Volumenvoltameter wird nur das Wasservoltameter benutzt und zwar wird dabei entweder das gebildete Gasgemisch (Knallgas) bestimmt, oder es werden die beiden Gase der Wasserzersetzung (Wasserstoff und Sauerstoff) einzeln aufgefangen. Als Elektrolyt dient dazu ein Gemisch aus 5 Vol. Wasser und 1 Vol. Schwefelsäure; als Elektroden zwei Platinstreifen. Die Stromstärke wird am genauesten aus dem Wasserstoffvolumen abgeleitet, weil das Wasser stets etwas freien Sauerstoff aufgelöst enthält.

F. Kohlrausch hat ein Voltameter zur absoluten Maßbestimmung starker Ströme konstruiert, das in Fig. 63 dargestellt ist; dasselbe besteht aus einem Glasrohr

von $2 \times 17 \times 40$ mm Querschnitt und 30 cm Länge; dasselbe ist in Raumteile von 5 zu 5 kcm eingeteilt. Das am unteren Ende konisch verjüngt zulaufende Rohr sitzt in einem kastenartigen, als Fuß dienenden Glasbehälter von etwa 500 kcm Inhalt. Es ist im unteren Teile mit zwei diametralen Öffnungen versehen, die mit Kautschukpfropfen geschlossen sind; durch diese gehen die Platinelektroden in das Rohr hinein. Die positive Elektrode besteht aus einem einfachen Platinstreifen von 17 mm Breite und von 40 mm Länge, die negative Elektrode besteht aus einem gabelartigen Platinblech von denselben Abmessungen und sie umgiebt die positive Elektrode mit 3 mm Abstand. Oben ist in das Rohr ein kleines Thermometer eingeschmolzen, um die Temperatur des Apparates zu bestimmen. Das Rohr ist mit 20proz. Schwefelsäure gefüllt; der Widerstand der Flüssigkeitssäule beträgt $^1/_{30}$ Ohm. Ein Strom von 30 Ampères entwickelt daher in der Zeiteinheit eine Wärmemenge von

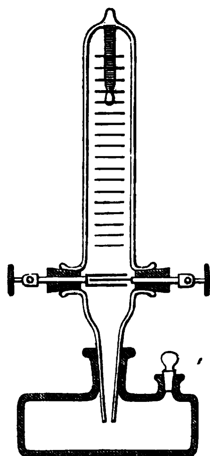


Fig. 63.

$$0.24 \times 30^2 \times \frac{1}{30} = 7.2 \text{ Kalorien-gr.}$$

Es sind ungefähr 30 Sekunden nötig, um 200 kcm Knallgas zu erzeugen; diese Gaserzeugung ist äquivalent einer Wärmemenge von

$$30 \times 7.2 = 216 \text{ Kalorien-gr.}$$

Bei mittlerem Luftdruck und mittlerer Temperatur entwickelt ein Strom von 1 Ampère in der Sekunde 0.2 kcm Knallgas, so daß die Zahl der in der Sekunde freiwerdenden

Kubikcentimeter Gas mit 5 multipliziert die Stromstärke in Ampères ergiebt.

Mit Benutzung des Wasservoltameters bestimmte Jacobi die Stromeinheit als einen Strom, durch dessen Intensität in der Minute 1 kcm Knallgas (auf 0° Temperatur und 760 mm Barometerstand reduziert) entwickelt wird; diese Bestimmung ist jedoch nicht ganz genau und eine solche auch schwierig genau auszuführen. Genauere Ergebnisse sind mittels der Gewichtsvoltameter zu erhalten.

Bei den Gewichtsvoltametern benutzt man als Elektrolyt für stärkere Ströme eine konzentrierte Lösung von Kupfer- oder Zinksulfat, für schwächere Ströme eine Lösung von Silbernitrat. Als Elektroden dienen zwei parallele Lamellen des entsprechenden Metalls.

Bezüglich der Kupfer- und Silber-Voltameter sind von Gray eingehende Versuche ausgeführt worden, wobei sich herausstellte, daß die Bestimmung mittels des Kupfervoltameters bequemer, mittels des Silbervoltameters aber genauer ist. Die Kathode des Silbervoltameters soll aus zwei Lamellen reinen Silbers bestehen, die zu beiden Seiten in gleicher Entfernung von der ebenfalls aus reinem Silber bestehenden, aber etwas kleineren Lamelle, welche die Anode bildet, angebracht sind. Diese Lamellen müssen mit größter Sorgfalt gereinigt sein und ihre Oberfläche muß im Verhältnis zu der zu messenden Stromstärke stehen. Um einen anhaftenden krystallinischen Silberniederschlag zu erhalten, ist eine 5prozentige Silbernitratlösung zu benutzen und die Stromstärke muß 0.005 bis 0.002 Ampère für das Quadratcentimeter der Oberfläche betragen, auf welcher der Niederschlag sich absetzen soll. Man kann auch die Stromstärke aus der Gewichtsverminderung der Anode bestimmen, wobei aber die Stronstärke 0.0025 Ampère für das Quadratcentimeter der Anode nicht übersteigen darf. Gray empfiehlt dieselben Verhältnisse auch für das Kupfervoltameter.

Durch den Gewichtsverlust infolge der in der Flüssigkeit stattfindenden Korrosion entsteht ein Fehler, der fast pro-

portional der eingetauchten Oberfläche ist und der zu einem Minimum wird, wenn die Dichtigkeit der Kupfersulfatlösung 0.10 bis 0.15 beträgt. Die Stromdichte darf für das Quadratcentimeter der Kathode nicht 0.02 Ampère übersteigen. Die Lösungen des Elektrolyts müssen etwas freie Säure enthalten, um die Oxydation des ausgefällten Metalls zu verhüten.

Mit Bezug auf die Quantität des Niederschlags zur wirksamen Elektrizitätsmenge ist zu bemerken, daß entspricht:

1 Coulomb 0.32959 Milligramm Kupfer
1 „ 1.11815 „ Silber.

93. Die Elektrodynamometer. — Bei den Elektrodynamometern wirkt ein feststehender Stromkreis auf einen beweglichen Stromkreis ein. Es werden diese Apparate zur Messung von Strömen, sowie zur Messung elektrischer Energiewirkung benutzt, wobei das Produkt $E\,I = I^2\,R$ gemessen wird.

Das älteste Elektrodynamometer ist das von W. Weber; dasselbe besteht aus zwei cylindrischen Drahtspulen mit vertikalen Achsen. Die eine dieser Spulen ist fest mit dem Gestell des Instruments verbunden, die andere bifilar an stromleitenden Drähten aufgehängt. Das durch die bifilare Aufhängung gebildete Kräftepaar (Torsionsmoment) ist proportional dem Torsionswinkel, während das elektrodynamische Kräftepaar proportional dem Produkt der beiden, die beiden Spulen durchfließenden Ströme, dem Kosinus des Ablenkungswinkels der Spulen und der Konstanten des Instrumentes (d. h. einem aus der Konstruktion des Instrumentes entspringenden, als unveränderlich betrachteten Werte) ist. Sind die beiden Ströme von derselben Stärke I, ist ferner der Torsionswinkel, der auch dem Ablenkungswinkel der Spulen entspricht, gleich α und K die Konstante des Instruments, so gilt die Gleichung:

$$I^2 = K \operatorname{tang} \alpha.$$

Da das wirksame Kräftepaar (Moment) eine Funktion des Quadrates der Stromstärken ist, so bleibt dessen Wert

von der Stromrichtung unbeeinflußt und deshalb ist dieses Instrument auch zur Messung von periodischen oder von Wechselströmen zu benutzen.

Mit Bezug hierauf ist aber zu bemerken, daß eigentlich nur bei konstanten oder Gleichströmen das Instrument zur Messung der Stromstärke dienen kann. Bezüglich der Wechselströme bestimmt die aus dem Produkt I^2 gezogene Quadratwurzel die mittlere Stromstärke.

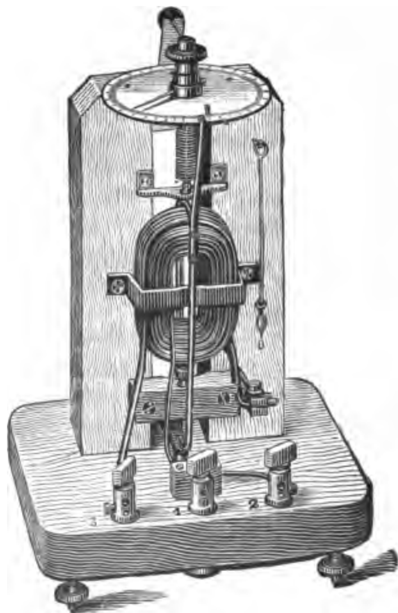


Fig. 64.

Das Elektrodynamometer von Siemens & Halske. Dieses zur Messung starker Ströme bestimmte und dazu vorzüglich geeignete Instrument hat die in Fig. 64

dargestellte Konstruktion; dasselbe ist für die elektrotechnische Praxis bestimmt und vollkommen dazu geeignet, weshalb dasselbe besonders in den Maschinenstationen elektrischer Beleuchtungsanlagen zur Anwendung gelangt ist. Die Messung erfolgt nach der Torsionsmethode. Zu dem Zwecke ist die äußere der beiden angenähert ovalen rahmenförmigen Drahtspulen an einem Coconfaden und — ähnlich wie bei dem in Fig. 58 dargestellten Torsionsgalvanometer von Siemens & Halske — außerdem noch an einer diesen Faden umgebenden spiralförmigen Torsionsfeder aufgehängt, deren oberes Ende an einem vertikalen, mittels eines Knopfes drehbaren Zapfen befestigt ist. Die beiden Drahtenden dieser drehbaren Spule tauchen in je ein auf der Grundplatte achsial zur Spule angebrachtes Quecksilbernäpfchen, die mit den für den äußeren Stromkreis verbundenen Klemmen in elektrischer Verbindung stehen. Infolge der Spulenanordnung ist die Einwirkung des Erdmagnetismus auf die Angaben des Instrumentes praktisch einflußlos. Das Instrument ist mit zweierlei Wickelung, aus dickem und dünnem Drahte, versehen, um zum Messen von Gleichströmen und Wechselströmen dienen zu können.

Mit der beweglichen Spule ist ein leichter Zeiger verbunden, dessen breites, mit einer Marke versehenes, rechtwinklig umgebogenes Ende am Rande eines oberhalb des Gestells angebrachten horizontalen Zifferblattes spielt. Bei jeder Messung wird die Marke des Zeigers durch die Torsion der Spiralfeder auf den Nullpunkt zurückgebracht, während mittels eines mit der Hand einstellbaren Zeigers der Torsionswinkel markiert wird.

Fig. 65 S. 182 zeigt ein von der Firma Siemens & Halske konstruiertes astatisches Spannungsdynamometer, welches zu direkten Messungen für 90 bezw. 160 Volt bei Gleichstrom und Wechselstrom zu benutzen ist. Das Prinzip ist dasselbe wie bei dem vorhergehenden Dynamometer, jedoch sind hier sowohl die feststehenden wie die beweglichen Spulen aus dünnem Drahte hergestellt und zu einem

astatischen Paare vereinigt, um das Instrument von äußeren magnetischen Einflüssen möglichst zu befreien.



Fig. 65.

Das Induktions-Elektrodynamometer von Giltay und Nipho. Der zu messende Wechselstrom induziert bei diesem Instrument in zwei Leiterkreisen dynamisch aufeinanderwirkende Ströme und aus der Größe des dadurch hervorgerufenen Drehungsmomentes der beweglichen Rolle wird die Größe der Amplitude des zu messenden Stromes bestimmt. Fig. 66 zeigt schematisch die Einrichtung. Die Spule A ist mit den Drahtwindungen a und b versehen; durch die Windungen a wird der zu messende primäre Wechselstrom geführt, so daß derselbe in den umgebenden Windungen b, die mit den beiden identischen Drahtspulen B

ein geschlossenes Leitersystem bilden, einen Sekundärstrom hervorruft. In dem cylindrischen Hohlraume der Induktionsspule A hängt an Coconfäden eine Drahtspule C, mit welcher das Drahtröllchen D fest verbunden ist; C und D bilden ebenfalls zusammen ein geschlossenes Leitersystem. Der primäre Wechselstrom induziert demnach Ströme in b und C, welche durch ein Drehungsmoment auf das bewegliche Röllchen D einwirken. Wenn das Instrument stromlos ist, so müssen die Windungsebenen der Spule B und des Röllchens D senkrecht aufeinander stehen. Die Beobachtung der Drehwinkel erfolgt mittels Spiegels, Fernrohrs und Skala.

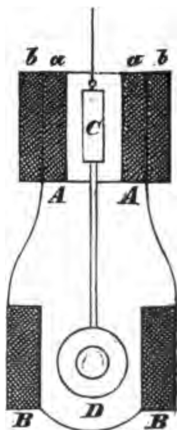


Fig. 66.

Elektrodynamische Wage von W. Thomson. Die Hauptschwierigkeit bei der Konstruktion von Elektrodynamometern für sehr starke Ströme liegt in der Herstellung der Kontakte, wozu Quecksilber nicht gut geeignet ist. Thomson hat deshalb eine metallische Verbindung in Vorschlag gebracht, die für alle elektrodynamischen Apparate passend ist. Hiernach wird der bewegliche Teil des Instrumentes mit dem festen Teile durch zwei Reihen äußerst feiner vertikaler und paralleler Drähte vereinigt, wodurch eine leitende sehr biegsame Verbindung hergestellt wird.

Das schematisch in Fig. 67 S. 184 dargestellte Instrument besteht aus vier festen Spulen A und zwei mit einander durch eine Art Wagebalken verbundenen und durch die erwähnte, an der Achse mn angebrachte Drahtaufhängung beweglich gemachten Spulen BB. Der Strom durchläuft die beiden beweglichen Ringspulen in umgekehrter Richtung, um die Einwirkung des Erdmagnetismus zu kompensieren. In der Gleichgewichtsstellung befinden sich die beiden

beweglichen Spulen sehr nahezu in der Horizontalebene inmitten der oberen und unteren festen Spulen und die Verhältnisse sind derartig gewählt, daß die auf jede der beiden beweglichen Ringspulen ausgeübte Kraft für eine Abweichung von 1 cm aus der Mittellage nach der einen oder anderen Richtung konstant bleibt. Diese Gleichgewichtslage wurde gewählt, damit die Abstoßung zwischen den Spulen eine überwiegende Wirkung ausübe, wodurch die Stabilität des Gleichgewichtes gesichert wird*). Zur Messung

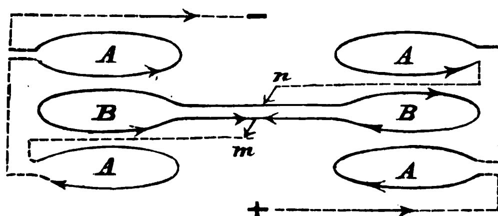


Fig. 67.

von Wechselströmen sind die Ringspulen aus Kabeln hergestellt, in denen jeder Draht mittels Seide isoliert ist, um eine gleichförmige Stromverteilung im ganzen Querschnitte trotz der raschen Stromwechsel zu erzielen. Mit dem beweglichen System ist ein horizontales Lineal verbunden, worauf ein Gewicht verschiebbar ist, um die elektrodynamische Wirkung auszugleichen. Dieses Gewicht läßt sich mittels einer sinnreichen Vorrichtung von außen innerhalb des Gehäuses verschieben.

94. Einige allgemeine Bemerkungen über Strommessungen. — Wenn der zu messende Strom eine für die Empfindlichkeit des Galvanometers zu große Intensität besitzt, so mißt man einen bestimmten Bruchteil desselben in einer Abzweigung.

---

*) Man vergl. Hospitalier, „Traité élémentaire de l'énergie électrique". Tome I. Paris 1890. S. 374.

Der Hauptstrom, der in den beiden Endpunkten des Galvanometers endigt, wird in zwei Teile geteilt, der eine, von angemessener Stärke, geht durch das Instrument, der andere durch eine Zweigleitung oder einen Nebenschluß.

Man benutzt hierzu die in Fig. 68 schematisch dargestellte Anordnung. Mit S_1, S_2, S_3 sind die verschiedenen Nebenschlüsse, mit g der Widerstand des Galvanometers, mit $\frac{g}{m}$ der Widerstand des aus dem Nebenschluß und dem Galvanometer bestehenden Systems und mit ϱ_1, ϱ_2, ϱ_3 die zum Schutze des Galvanometers eingeschalteten Widerstände bezeichnet.

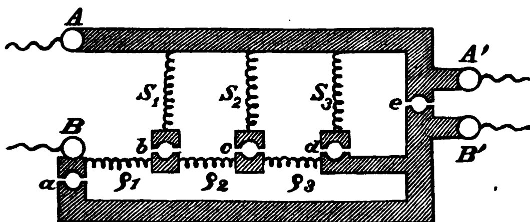


Fig. 68.

Die den Nebenschlüssen S_1, S_2, S_3 entsprechenden Widerstände sind alsdann $\frac{g}{m_1 - 1}$, $\frac{g}{m_2 - 1}$, $\frac{g}{m_3 - 1}$ und es bestehen die Gleichungen:

$$\varrho_1 = g\left(1 - \frac{1}{m_1}\right),$$

$$\varrho_1 + \varrho_2 = g\left(1 - \frac{1}{m_2}\right),$$

$$\varrho_1 + \varrho_2 + \varrho_3 = g\left(1 - \frac{1}{m_3}\right).$$

Die Klemmen A und B dienen zum Einschalten des äußeren Stromkreises, das ist beispielsweise der Lichtstromleitung. Bei A′ B′ ist das Galvanometer eingeschaltet. Durch Einstecken eines Stöpsels (Kontaktes) in das Loch a wird der ganze Strom durch das Galvanometer geführt. Durch Einstecken eines Stöpsels in b werden gleichzeitig der Nebenschluß S_1 und der Kompensationswiderstand ϱ_1 eingeschaltet; durch Einstecken eines dritten Stöpsels in c werden die Nebenschlüsse S_1 und S_2, sowie die Widerstände ϱ_1 und ϱ_2, durch Einstecken eines vierten Stöpsels die Nebenschlüsse S_1, S_2 und S_3 und die Widerstände ϱ_1, ϱ_2 und ϱ_3 eingeschaltet. Wird ein Stöpsel bei e eingesteckt, so ist das Galvanometer in sich selbst, oder — wie man zu sagen pflegt — kurz geschlossen.

Ein System von Nebenschlüssen mit den zugehörigen Kompensationswiderständen bildet einen für jedes Präzisionsgalvanometer nötigen Hilfsapparat. Man giebt den Nebenschlüssen gewöhnlich die Widerstände $\frac{g}{9}$, $\frac{g}{99}$, $\frac{g}{999}$, so daß ihre multiplizierenden Kräfte sind bezw. 10, 100, 1000. Bei Benutzung der Nebenschlüsse für genauere Messungen sind die durch Temperaturerhöhung entstehenden Fehler in Betracht zu ziehen.

Die Messung sehr starker Ströme kann in vorteilhafter Weise auch mittels des Potentialgefälles (der Potentialdifferenz) erfolgen. Diese Methode besteht darin, daß zwei entsprechend von einander entfernte Punkte des Hauptstromkreises, zwischen denen der Widerstand (Nebenschluß) S besteht, mit den Klemmen des Galvanometers verbunden werden. Wenn das Galvanometer einen gegen den Widerstand des Nebenschlusses nicht sehr beträchtlichen Widerstand hat, so ist der Gesamtwiderstand:

$$g_1 = \frac{g}{m} = \frac{g\,S}{g + S} = S\,\frac{g}{g + S}$$

nur sehr wenig von dem Widerstande S und die Stromstärke I_1 auch nur wenig von der Stromstärke I verschieden, so daß durch die Einschaltung des Galvanometers in einen Zweig des betreffenden Stromkreises die Gesamtstromstärke I nicht merklich geändert wird. Man kann deshalb die zwischen den beiden Punkten A und B herrschende, einer elektromotorischen Kraft entsprechende Potentialdifferenz $E = V_1 - V_2$ durch Vergleichung des Ablenkungswinkels δ mit dem Ablenkungswinkel δ_0 erhalten, der durch eine elektromotorische Normalkraft, etwa durch ein Daniellsches Element, erhalten wird, dessen innerer Widerstand gegen den Widerstand des Galvanometers gering ist. Es ist nämlich

$$\frac{E}{\delta} = \frac{E_0}{\delta_0}, \text{ woraus folgt } i = \frac{E}{S} = \frac{E_0}{S} \frac{\delta}{\delta_0}.$$

Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, daß die Apparate mit beweglicher Drahtrolle für die Einwirkung von Intensitätsdifferenzen sehr empfindlich gemacht werden können, wenn das auf die Rolle einwirkende Magnetfeld hinreichend stark ist. William Thomson hat diesen Umstand zur Konstruktion seines sogenannten Siphon-Recorder benutzt, der als Rezeptor bei der überseeischen Telegraphie dient. Der Draht ist um einen länglich viereckigen Rahmen gewickelt, der bifilar aufgehängt und unterhalb durch einen aufgespannten Draht gehalten wird. Der Rahmen befindet sich zwischen den Polen eines starken Magnets und ist unter dessen Beeinflussung um seine Vertikalachse drehbar. Nach diesem Prinzip ist auch von d'Arsonval ein empfindliches und gegen äußere magnetische Einflüsse gesichertes Galvanometer hergestellt worden.

95. **Die Strom- und Spannungsmesser.** — Bei diesen Instrumenten ist Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit die Hauptsache; dieselben müssen auch eine etwas rauhe Behandlung vertragen können, wogegen nicht verlangt wird, daß ihre Anzeigen den höchsten erreichbaren Grad der Genauigkeit

besitzen, sondern gestattet ist, daß deren Angaben innerhalb der für die Praxis als zulässig erachteten Grenzen schwanken.

Die Stromzeiger unterscheiden sich in ihrer Einrichtung zumteil nur dadurch von den Spannungszeigern, daß ihre elektromagnetischen Spulen, angemessen dem durchgehenden Strome, aus dicken Windungen von geringer Anzahl bestehen, während die Spannungszeiger Spulen besitzen, die mit einem dünnen langen Drahte in vielen Windungen bewickelt sind. Im ersteren Falle üben die innerhalb gewisser Grenzen auf das Ampèremeter einwirkenden Spannungsschwankungen keinen Einfluß auf die Angaben des Instrumentes aus, während infolge des großen Widerstandes der Spulen in den Voltmetern selbst geringe Spannungsveränderungen sofort direkt proportional auf die das Instrument beeinflussende Stromstärke einwirken. In den vom Strom beeinflußten Teilen dieser Instrumente sucht man Eisen möglichst zu vermeiden, oder beschränkt dasselbe auf die möglichst geringste Masse, weil der remanente Magnetismus die Instrumente träge und ungenau macht.

So bestehen z. B. die Strom- und Spannungszeiger der Firma Siemens & Halske, Berlin, im wesentlichen aus einer Kupferdrahtspule, welche zwei gelenkig an der Zeigerachse angehängte dünne Eisenstäbchen magnetisiert und in ihre Höhlung entsprechend der Stromstärke, bezw. Spannung, hineinzieht. Die Bewegung der Stäbchen überträgt sich auf die Achse, so daß der mit derselben fest verbundene Zeiger an einem Teilkreisbogen verschoben wird. Das bewegliche System ist so beschaffen, daß die Schwerkraft den anziehenden magnetischen Kräften das Gleichgewicht hält.

Ein Stromzeiger der Firma Siemens & Halske ist in Fig. 69 im Prinzip dargestellt. Der zu messende Strom wird durch einen in zwei spiralförmigen Windungen gebogenen dicken Kupferstab geführt. In diese Spirale ragt das Ende eines dünnen eisernen kreisbogenförmigen, um seinen Mittelpunkt C drehbaren Ringsegmentes B hinein, das am unteren Ende mit einem an einer Schraube

verstellbaren Gegengewicht G und mit einem um den Mittelpunkt C drehbaren Zeiger Z verbunden ist, so daß bei der Drehung des Ringsegmentes der Zeiger auf der bogenförmigen Skala spielt. Wenn durch die Kupferspirale

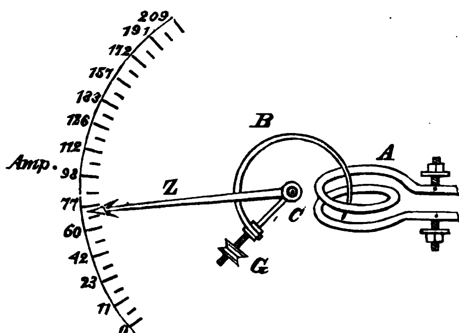


Fig. 69.

ein elektrischer Strom geht, so wird, je nach dessen Stärke, das eiserne Ringsegment mit seinem freien Ende mehr oder weniger weit in die Spirale hineingezogen und zwar um so mehr, je stärker der Strom ist, so daß der Zeiger auf der Skala die entsprechende Stromstärke in Ampères anzeigt.

Zwanzigstes Kapitel.

Die Elektrometer.

96. Zweck der Elektrometer. — Diese Instrumente sind zur Messung einer zwischen zwei elektrisch erregten Körpern bestehenden Potentialdifferenz bestimmt. Hierzu kann die Messung des Elektrizitätsstromes dienen, welcher in einem

zur Verbindung der beiden fraglichen Punkte benutzten, mehr oder weniger Widerstand bietenden Elektrizitätsleiter infolge jener Potentialdifferenz zum Vorschein kommt, ferner können aber zur Bestimmung der Potentialdifferenz elektrostatische Wirkungen dienen, so insbesondere der durch die Potentialdifferenz herbeigeführte elektrostatische Druck, der als Anziehung oder Abstoßung auftritt.

Nach William Thomson werden die Elektrometer in drei Klassen eingeteilt.

1. Die Elektrometer mit Abstoßung, wozu die Pendelelektrometer und die Coulombsche Drehwage gehören.

2. Die symmetrischen Elektrometer, bei denen sich eine Magnetnadel zwischen zwei dazu symmetrisch angeordneten, von einander isolierteu und auf verschiedene Potentiale gebrachten festen Leitern befindet, so daß die Ablenkung des beweglichen Teiles von dessen eigenen Potentiale und von der Potentialdifferenz zwischen den beiden festen Leitern abhängig ist. Hierher gehört insbesondere das Thomsonsche Quadrantenelektrometer.

3. Die Wägungselektrometer oder Elektrometer mit Abstoßung, bei denen man die zwischen den elektrisierten Leitern sich äußernde Anziehungskraft mittels eines Gewichtes ausgleicht und durch dieses Gewicht bestimmt. Das vollkommenste Instrument dieser Art und überhaupt das vollkommenste Elektrometer im allgemeinen ist das Thomsonsche absolute Elektrometer.

Ferner unterscheidet W. Thomson noch aus anderen Gesichtspunkten idiostatische und heterostatische Elektrometer. Die ersteren sind solche Instrumente, bei denen nur ein einziger Teil elektrische Ladung erhält, während bei den heterostatischen Instrumenten noch die von fremden Elektrizitätsquellen herbeigeführten Ladungen berücksichtigt werden.

97. Die Einrichtung und Benutzungsweise des Thomsonschen absoluten Elektrometers. — Mittels dieses Instrumentes wird

die elektrische Anziehung, die zwischen einer unbegrenzten Ebene und einer zu dieser parallelen Platte hervorgerufen wird, durch Gewichte ausgeglichen und danach bestimmt.

Die Hauptbestandteile des in Fig. 70 abgebildeten Instrumentes werden durch zwei horizontale, kreisrunde Metallplatten gebildet; die eine dieser Platten, A, ist auf einem isolierten Stabe befestigt, dessen unteres Ende mit Mikrometerschrauben-Gewinde versehen ist; der Kopf C′ dieser Mikrometerschraube ragt unterhalb hervor. Die zweite, kleinere Platte oder Scheibe paßt mit ganz geringem Spielraum in eine kreisförmige Öffnung, die in der Mitte einer leitenden, zu A parallelen und etwas größeren Platte B angebracht ist. Diese kleinere Scheibe wird von den Blattfedern S getragen, die sich am unteren Ende einer Mikrometerschraube befinden, deren oberhalb hervorragender Kopf C mit Teilung versehen ist. Wenn die größere Scheibe A und die kleine Scheibe auf verschiedene elektrische Potentiale mit ungleichen Vorzeichen geladen worden sind, so wird die kleine Scheibe von der gegenüberstehenden Platte A angezogen und die Spannung der Federn S derartig geregelt, daß die Unterseite der kleinen Scheibe stets mit der Unterseite der Platte B in einer Ebene liegt. Die entsprechende Spannung der Federn berechnet sich aus den Umdrehungen der Schraube, die am Kopfe C bis zu kleinen Bruchteilen abzulesen sind.

Wird alsdann die Potentialdifferenz zwischen A und der kleinen Scheibe aufgehoben, indem man beide Teile mittels einer leichten, biegsamen Drahtspirale in leitende Verbindung bringt, und belastet man hierauf die kleine Scheibe allmählich mit Gewichten, so kann man durch Drehung der Schraube C diese Scheibe entgegengesetzt zur Wirkung der Gewichte wiederum in die oben erwähnte Stellung zurückbringen. Auf diese Weise läßt sich eine Reduktionstabelle anlegen, mittels deren man die bei elektrometrischen Versuchen abgelesenen Umdrehungen der Schraube C in absolute Krafteinheiten umsetzen und somit die Anziehung zwischen der

kleinen Scheibe und der Platte A in absolutem Maße bestimmen kann. Um zu verhüten, daß die Dichtigkeit der elektrischen Ladung der kleinen Scheibe nach dem Rande zu abnimmt und um eine gleichförmige Dichtigkeit der Ladung auf derselben zu erhalten, wird diese Scheibe bei der Messung stets mit der Platte B in eine Ebene gebracht, so daß sie den zentralen Teil derselben bildet und somit die Dichtigkeit auf der kleinen Scheibe, sowie auf dem ihr gegenüberliegenden Teile der Platte A als vollkommen gleichförmig angesehen werden kann. Thomson bezeichnete deshalb die ringförmige Scheibe B, welche die bewegliche kleine Scheibe umfaßt, als Schutzring. Über derselben, und damit leitend verbunden, befindet sich eine zweiteilige runde Messingbüchse D, von der in der Figur die eine Hälfte etwas zur Seite geschoben ist, um die bewegliche Scheibe sichtbar zu machen. Diese Büchse hat den Zweck, die obere Seite der kleinen Scheibe auf gleichem Potential mit dem Schutzringe zu erhalten und sie vor der Influenz der umgebenden Körper zu schützen. Um genau zu erkennen, wann die Unterseite der kleinen Scheibe sich mit der Unterseite des Schutzringes in einer Ebene befindet, ist die folgende Einrichtung angebracht: In einem auf der beweglichen Scheibe befestigten Rähmchen ist ein Haar horizontal eingespannt; in dem Augenblick, wo die Scheibe gerade in eine Ebene mit dem Schutzringe zu liegen kommt,



Fig. 70.

wird ein objektives Bild des Haares durch die Sammellinse l, die vor einer entsprechenden Öffnung in der Büchse D angebracht ist, genau in die Mitte zwischen die Spitzen von zwei fest einander berührenden Mikrometerschrauben V projiziert. Endlich ist außen an dem Glasgehäuse, das den ganzen Apparat umschließt, eine Lupe l′ befestigt, durch welche die Lage des Haarbildes zwischen den Schraubenspitzen mit genügender Vergrößerung betrachtet werden kann.

In der beschriebenen Form ist das absolute Elektrometer heterostatisch, indem die untere Scheibe A durch den isolierten Zuleitungsdraht E und die Messingspirale r mit dem Leiter verbunden wird, dessen Potential V_1 bestimmt werden soll, während das Potential des Schutzringes und der beweglichen Scheibe konstant auf dem Werte V_2 erhalten wird. Mittels der Mikrometerschraube C′ bringt man dann die Platte A in eine auf der Skala m abzulesende Entfernung a von dem Schutzringe und erhält so durch Ablesung der Anzahl der Umdrehungen der Mikrometerschraube C die Kraft R, die nötig ist, um die bewegliche Scheibe mit Überwindung der Anziehung der Platte A in der Ebene des Schutzringes zu erhalten.

Bezeichnet man noch mit S den Flächeninhalt der beweglichen Scheibe, so wird die gesuchte Potentialdifferenz bestimmt durch die Gleichung

$$V_1 - V_2 = a \sqrt{\frac{8 \pi R}{S}}.$$

Bei der eben beschriebenen Messungsmethode ist es äußerst schwierig, den Parallelismus der Platten A und B genau herzustellen und ihren Abstand a scharf zu bestimmen, man umgeht nach Thomson diese Schwierigkeit dadurch, daß man nur Differenzen der Abstände mißt. Hierbei wird das Potential des Schutzringes B konstant auf dem bestimmten Werte V_2 erhalten und die Platte A nach einander mit den beiden Leitern in Verbindung gebracht, deren Potentialdifferenz zu messen ist, also z. B. mit den beiden Klemmen

eines galvanischen Elementes oder mit der Erde und dem zu untersuchenden Leiter. Auf diese Weise werden zwei Versuche ausgeführt. Bei dem ersten Versuche bringt man die Platte A in eine willkürliche, aber passend gewählte Entfernung a vom Schutzringe B und bestimmt die Kraft R, die erforderlich ist, um das Bild des Haares mitten zwischen die Schraubenspitzen zu bringen; beim zweiten Versuche ändert man dagegen die Entfernung zwischen A und B so lange, bis man einen Wert a′ findet, für den bei gleicher Spannung der Federn das Haar in derselben Lage erscheint.

Wenn alsdann der Wert des Potentials von A in beiden Versuchen beziehungsweise V_1 und V_1' war, so hat man:

$$V_1 - V_2 = a\sqrt{\frac{8\pi R}{S}};\ V_1' - V_2 = a'\sqrt{\frac{8\pi R}{S}}$$

und daraus

$$V_1 - V_1' = (a - a')\sqrt{\frac{8\pi R}{S}}.$$

Um diese Formel mit Sicherheit anwenden zu können, muß das Potential V_2 in beiden Versuchen absolut den gleichen Wert haben; man muß also Mittel besitzen, dasselbe konstant zu erhalten und sich von dieser Konstanz zu überzeugen. Zu dem Zweck hat Thomson das Glasgehäuse des Apparats durch einen innen und außen angebrachten, bis zu einer gewissen Höhe reichenden Stanniolbelag in einen Kondensator umgewandelt, dessen äußerer Belag mit der Erde und dessen innerer Belag mit dem Schutzringe und der beweglichen Scheibe in Verbindung steht. Zur Beobachtung des Innern sind in beiden Belagen Aussparungen angebracht. Dieser Kondensator wird zu Anfang mittels eines Elektrophors oder eines mit Katzenfell geriebenen Ebonitstreifens geladen, welche Ladung für längere Zeit konstant bleibt, wenn das Gehäuse aus einer geeigneten Glassorte (einer Art Flintglas) hergestellt ist und die Luft im Innern trocken erhalten wird, was dadurch geschehen kann, daß man Bims=

steinstücke, die mit konzentrierter Schwefelsäure getränkt sind, auf den Boden legt. Da aber trotzdem das Potential V_2 mit der Zeit abnimmt, so bringt Thomson zur Kontrolle der Veränderung und Wiederherstellung des Anfangswertes von V_2 unter dem Deckel des Elektrometers noch einen besonderen kleinen Apparat an, der den Wert des Potentials erkennen läßt. Dieser sogenannte „idiostatische Ladungsmesser“ ist im wesentlichen ein auf dasselbe Prinzip begründetes Elektrometer und besteht aus einer horizontalen Scheibe, die bleibend mit dem Schutzringe B verbunden ist und über der sich ein zweiter Schutzring befindet. In letzterem ist ein quadratisches Loch ausgeschnitten und darüber legt sich ein leichtes Aluminiumplättchen, das denselben Dienst verrichtet, wie die bewegliche Scheibe im großen Apparat. Der Schutzring des Nebenapparats und sein Aluminiumplättchen sind von der beweglichen Scheibe des Hauptapparates isoliert, aber in bleibender Verbindung mit der Erde. An der einen Seite läuft das Plättchen in einen horizontalen dünnen Arm aus, der in eine Gabel endet, zwischen der ein Haar horizontal ausgespannt ist. Dicht dahinter steht ein kleines vertikales weißes Emailplättchen, auf dem zwei schwarze Punkte in einem ganz geringen, die Haardicke etwas übertreffenden Abstande markiert sind. Mittels einer davor befindlichen Lupe kann man die genaue Einstellung des Haares zwischen diesen beiden Punkten scharf beobachten und somit bemerken, ob die untere Seite des Aluminiumplättchens mit der unteren Seite seines Schutzringes genau in eine Ebene fällt. Das Aluminiumplättchen bildet mit seinem Arme eine Art Wagebalken, dessen horizontale, rechtwinklig zum Arme liegende Achse durch einen Platindraht gebildet wird. Spielt das Visierhaar dieses Wagebalkens genau zwischen die beiden Punkte ein, so hat das Potential V_2 den verlangten Wert.

Um das Potential V_2 nötigenfalls wieder auf seinen ursprünglichen Wert zu bringen, benutzte Thomson den Replenisher (Wiederhersteller, vergl. S. 68), der unter dem Deckel des Elektrometers (Fig. 70) angebracht ist und

der ein kleines Influenzmaschinchen bildet. Dieser kleine Apparat besteht aus einem Gehäuse, aus zwei in der Form von Cylindersegmenten gebogenen, von einander isolierten Metallstreifen, von denen der eine mit dem innern Stanniolbelag des Glasgehäuses des Hauptinstrumentes, der andere mit der Erde verbunden ist. In diesem Gehäuse ist drehbar eine vertikale Achse aus Ebonit, die mit einem Knopfe aus dem Deckel des Elektrometers hervorragt und somit leicht in Umdrehung zu versetzen ist. Ein auf der Achse befestigtes Querstück von Ebonit trägt an jedem seiner beiden Arme ein Metallplättchen von einer dem Gehäuse entsprechenden Krümmung. Durch geeignet am Gehäuse des Replenishers angebrachte Federn, die bei der Drehung der Achse nach einander mit deren Metallplättchen in Kontakt kommen, kann bei Drehung der Achse durch Influenz das Potential des inneren Belags am Gehäuse des Elektrometers entsprechend erhöht werden.

Zur Messung sehr starker Potentialdifferenzen von 400 bis zu 10000 Volts hat William Thomson ein astatisches Elektrometer konstruiert; dasselbe besteht aus zwei vertikal angeordneten diametralen, paarweis mit einem Zwischenraum verbundenen Quadranten, welche die entsprechend geformte Aluminiumnadel, die um eine horizontale Achse schwingen kann, zwischen sich fassen. Die festen Quadranten werden mit dem einen Punkte, die Nadel dagegen wird mit dem anderen Punkte der zu messenden Potentialdifferenz verbunden. Das ganze bildet somit einen Kondensator von veränderlicher Kapazität, bei welchem das durch die elektrostatische Wirkung erzeugte Drehungsmoment durch das Moment eines an das untere Ende der Nadel angehängten Gewichtes ausgeglichen wird, welches Moment proportional dem Sinus des Ausschlagwinkels ist. Mit dem oberen Ende der Nadel ist ein auf einer Skala spielender Zeiger verbunden. Die Schwingung der Nadel wird in geeigneter Weise gedämpft. Um Kurzschluß zu verhüten, wodurch der Apparat zerstört werden würde, ist die

Einrichtung getroffen, daß die Verbindung zwischen dem Quadranten, der Nadel und den Punkten der Potentialdifferenz nur durch einen hohen Widerstand stattfinden kann, wozu ein mit einem angefeuchteten baumwollenen Dochte gefülltes Glasrohr benutzt wird.

98. Das Thomsonsche Quadrantenelektrometer. — Das Quadrantenelektrometer ist ebenfalls heterostatisch, unterscheidet sich aber von dem vorher beschriebenen Instrument durch den Meßapparat. Dieser Apparat besteht aus einem vierteiligen flachcylindrischen Gehäuse, worin eine bifilar aufgehängte horizontale Aluminiumlamelle oder Nadel C schwebt, deren Form einer 8 ähnelt, wie Fig. 71 erkennen läßt.

Das Glasgefäß, worin dieser Apparat sich befindet, ist (wie bei dem vorigen Instrument) durch äußeren und inneren Stanniolbelag ähnlich einer Leydener Flasche als Kondensator ausgebildet.

Das vierteilige Metallgehäuse wird durch die Quadranten A, B, C, D gebildet, von denen je die beiden diametralen durch Drähte mit einander verbunden sind, und es werden die Potentiale der so gebildeten beiden Quadrantenpaare auf verschiedener Höhe erhalten. Die Aluminiumnadel schwebt in diesem Gehäuse in der halben Höhe zwischen den Quadrantenpaaren. Bei den älteren Instrumenten war diese Nadel einfach an einem dünnen Draht aufgehängt und mit einer kleinen Magnetnadel verbunden, die durch einen Magnet gerichtet wurde. Bei den neueren Instrumenten ist aber die Nadel C bifilar aufgehängt und es wird die Direktionskraft der Schwere benutzt. In der Ruhelage steht die Nadel C mit ihrer Mittellinie in der Mitte des einen Spaltes

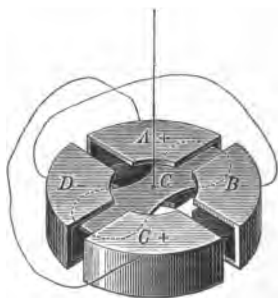


Fig. 71.

der Quadranten. Wird alsdann die Nadel elektrisch geladen, was wie bei dem vorigen Instrumente geschehen kann, so wird dieselbe, infolge der verschiedenen Ladung der Quadrantenpaare des Gehäuses, in ihren beiden Hälften von dem einen Quadranten angezogen, von dem benachbarten aber abgestoßen und somit zu einer Drehung veranlaßt. Dieser Drehung kann durch eine Gegentorsion der bifilaren Aufhängung das Gleichgewicht gehalten und somit die drehende Kraft bestimmt werden, ganz ähnlich, wie dies bei der Drehwage geschieht.

Fig. 72 zeigt das ganze Instrument und die Messungsmethode mit demselben. Die Beobachtung der Gleichgewichtslage der Nadel erfolgt durch Reflexion mittels eines kleinen,

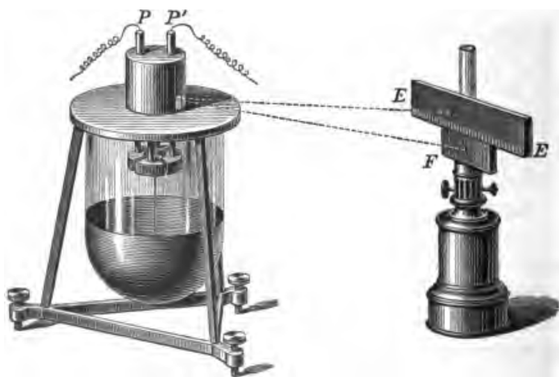


Fig. 72.

mit den Aufhängungsdrähten verbundenen Spiegels. Diesem Spiegel gegenüber steht ein Schirm **F** mit einem schmalen senkrechten Spalt, dessen Mittellinie durch einen feinen Platindraht markiert ist. Von einer hinter dem Schirme stehenden Lampe fällt das Licht durch ein Fenster des Gehäuses auf den Spiegel, der ein objektives Bild des Spaltes und

Drahtes auf eine horizontale, in etwa 1 m Entfernung vom Instrument aufgestellte Skala wirft.

Wir nehmen nun an, daß die beiden Quadrantenpaare sowie die Nadel auf konstanten Potentialen erhalten werden, die bezw. gleich V_1, V_2 und V sind; wenn sich der Zeiger um einen sehr kleinen Winkel Q gedreht hat und wiederum Gleichgewicht eingetreten ist, so ist das auf die Nadel wirkende Kräftepaar gleich dem von der Drehung des Bifilars herrührenden Kräftepaare $C s \sin \Theta$ und es besteht die Gleichung:

$$a (V_1 - V_2) \left[V - \frac{V_1 + V_2}{2}\right] = C s \sin \Theta$$

worin a die Kapazität der Nadel für die Winkeleinheit bezeichnet. Da der Ablenkungswinkel als sehr klein vorausgesetzt ist, so kann man noch den Sinus durch den Winkel selbst (in Kreisteilen) ausdrücken. Die Konstante a wird am besten durch Vergleichung mit einem absoluten Elektrometer bestimmt.

Wenn das Potential der Nadel so hoch ist, daß man das Verhältnis $(V_1 + V_2) : 2\,V$ außer Rechnung lassen kann, dann vereinfacht sich diese Formel auf:

$$\Theta = \frac{a}{C} (V_1 - V_3)\, V.$$

Bleibt das Potential der Nadel konstant, so ist die Ablenkung der Potentialdifferenz der beiden Quadranten proportional und die Kapazität der Nadel ist von der Ablenkung unabhängig. Das Prüfelelektrometer wird gewöhnlich so eingestellt, daß das Potential der Leydener Flasche und demnach auch das Potential der damit verbundenen Nadel 500 bis 1000 Volts erreicht, je nach dem gewünschten Empfindlichkeitsgrade. Die Ablenkung wird durch die letzte Formel ausgedrückt, wenn man den Quadranten konstante, entgegengesetzt gleiche Potentiale mitteilt und wenn das zu messende veränderliche Potential der Nadel zukommt. Das Instrument wirkt alsdann vollständig symmetrisch.

Verbindet man die Nadel mit dem einen Quadrantenpaare, beispielsweise mit dem, dessen Potential mit V_2 bezeichnet ist, so geht die obige Formel über in:

$$\Theta = \frac{a}{2\,C}\,(V - V_1)^2.$$

Wird alsdann das nicht mit der Nadel verbundene Quadrantenpaar mit der Erde verbunden, so ist $V_1 = 0$ und man erhält:

$$\Theta = \frac{a}{2\,C}\,V^2.$$

In diesem Falle ist das Instrument für absolute Messungen zu benutzen, wenn der Faktor $\frac{a}{2\,C}$ bekannt ist.

Ist das Instrument gleich dem absoluten Elektrometer mit Ladungs- und Meßvorrichtung versehen, so lassen sich die Messungen in absoluten Einheiten vornehmen. Das Quadranten-Elektrometer wird öfters auch als ein sehr empfindliches Elektroskop benutzt und zwar in der Weise, daß man eine elektrische Potentialdifferenz dadurch bestimmt, daß man sie mit einer gleichen Potentialdifferenz entgegengesetzter Art in das Gleichgewicht bringt. Man erkennt dieses Gleichgewicht daran, daß die Nadel des Elektrometers in ihrer mittleren Ruhelage verbleibt und also keinen Ausschlag ergiebt. Ein derartiges Messungsverfahren wird als „Nullmethode“ bezeichnet.

Figur 73 zeigt die Benutzung des Elektrometers zur Bestimmung der elektromotorischen Kraft einer galvanischen Batterie. Wenn das Instrument gehörig reguliert ist, so verbindet man die beiden entgegengesetzten Quadrantenpaare mit den Polen eines galvanischen Elementes, um sie auf gleichgroße aber entgegengesetzte Potentiale zu bringen. Hierauf verbindet man den einen Pol der zu untersuchenden Batterie mit dem Aufhängungsdrahte der Nadel und den anderen Pol mit der Erde.

Ein Hauptfehler des Quadranten-Elektrometers liegt darin, daß seine Schwingungen nicht aperiodisch sind, d. h. nicht isochron und regelmäßig stattfinden und nicht durch den zu bestimmenden Punkt begrenzt werden. So hat man bemerkt, daß, wenn man die beiden Quadranten eines Elektrometers abwechselnd mit zwei Punkten in Verbindung setzt, die eine konstante Potentialdifferenz haben, die Ausschläge der Nadel nur dann konstant bleiben, wenn Nadel und Quadranten aus demselben Metall bestehen, andernfalls ändert die elektromotorische Kraft des Kontaktes ihr Zeichen nicht in derselben Zeit wie die Potentialdifferenz der Quadranten.

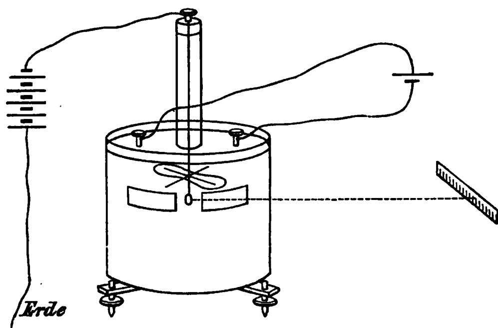


Fig. 73.

Man kann mit dem Quadranten-Elektrometer die folgenden Gesetze nachweisen:

1. Das Potentialgefälle in einem linearen Leiter oder Drahte. Dieses Potentialgefälle ist proportional der Länge des Leiters. Man benutzt zu dem Zwecke eine aus drei bis vier Daniell-Elementen bestehende Batterie und einen Rheochord (s. d.) d. i. einen abgemessenen Widerstandsleiter. Dieser Widerstandsleiter steht einerseits

mit der Batterie und anderseits mit der Erde in Verbindung; der andere Pol der Batterie ist ebenfalls mit der Erde verbunden. Indem man den Zeiger des Elektrometers mit irgend einer Stelle des mittels des Rheochords geteilten Drahtes verbindet, kann man nachweisen, daß das Potentialgefälle oder der Potentialunterschied (die Potendialdifferenz) proportional zur Länge des Drahtes, gemessen von dessen mit der Erde verbundenen Ende, ist.

2. Spannungsvermehrung durch hinter einander geschaltete Elemente. Indem man eine beliebige Anzahl von Elementen hinter einander schaltet, kann man nachweisen, daß die elektromotorische Gesamtkraft der verbundenen Elemente gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte der Einzelelemente ist.

3. Batterie auf Quantität. Indem man mehrere gleichartige Elemente mit ihren gleichnamigen Polen verbindet, das ist eine Batterie auf Quantität schaltet, kann man nachweisen, daß die elektromotorische Kraft der Batterie gleich derjenigen des Einzelelementes ist. Und ferner kann man nachweisen, daß die Abmessungen der Elemente keinen Einfluß auf die elektromotorische Kraft ausüben.

4. Volta-Kette. Man bildet Volta-Elemente, indem man zwei verschiedene Metalle in gewöhnliches Wasser taucht, und weist durch das Elektrometer nach, daß die elektromotorische Kraft nicht von den dazwischen geschalteten Metallen, sondern nur von den Endmetallen abhängig ist. Nimmt man z. B. einesteils Platin und Zink, anderenteils zwei Elemente, von denen das eine aus Platin und Eisen und das andere aus Eisen und Zink gebildet ist, so ist die Summe der elektromotorischen Kräfte der beiden letzteren genau gleich der elektromotorischen Kraft des ersten Elementes.

5. Konzentration der Säuren. Man weist nach, daß die elektromotorische Kraft eines Platin-Zink-Elementes nicht merklich geändert wird, wenn man das Wasser durch verdünnte Schwefelsäure ersetzt.

99. Elektrometer von Carpentier, Curie Blondlot und Lippmann. — Die sogenannten Elektrometer sind zum Teil mit Rücksicht auf die leichtere Handhabung konstruiert worden.

Das von J. Carpentier konstruierte Elektrometer besteht aus einem länglichen aufgehängten Messing- oder Kupferrahmen, dessen etwa 1 cm breite Langseiten cylindrisch gekrümmt sind, und der konzentrisch zwischen zwei anderen, nach Quadranten geteilten festen Cylindern hängt. Je zwei diametrale Paare dieser festen Quadranten stehen in elektrischer Verbindung, ähnlich wie bei dem Thomsonschen Quadranten-Elektrometer. In der Ruhelage hängt der Rahmen symmetrisch zu zwei benachbarten Quadrantenpaaren. Dieses Elektrometer befindet sich zwischen den Schenkeln eines permanenten Hufeisenmagnets von genügender Stärke und die vier inneren festen Quadranten bestehen aus Eisen, um das zur Dämpfung der Schwingungen des drehbaren Rahmens dienende magnetische Feld zu verstärken. Bei einer anderen Anordnung ist das Elektrometer horizontal zwischen den Magnetpolen angebracht und der Rahmen oscilliert um eine horizontale Achse, an der vorn ein langer Zeiger sitzt, der auf einer Skala spielt. Bei der Elektrisierung des Rahmens auf ein zu bestimmendes Potential schlägt der Zeiger rasch bis auf den entsprechenden Teilpunkt aus, ohne denselben zu überschreiten, sodaß dieses Instrument als vollständig aperiodisch zu gelten hat.

Bei dem astatischen Elektrometer von Curie und Blondlot, welches als eine Modifikation des Thomsonschen Quadranten-Elektrometers zu betrachten ist, besteht die Nadel aus zwei getrennten Halbkreisen, die mit einem diametralen Zwischenraum durch ein Ebonitstück in einer Ebene vereinigt, dabei aber von einander elektrisch isoliert sind. Die Quadranten sind durch zwei feste halbkreisförmige Platten gebildet, von etwas größerem Durchmesser als die Nadel und wie diese in einer Ebene liegend durch einen diametralen Zwischenraum getrennt. Bezeichnet man die

beiden Potentiale der Nadelhälften mit V_1 und V_2 und die der beiden festen Sektoren mit V_3 und V_4, während a der Ablenkungswinkel der Nadel ist, so gilt für die Ausgleichung der elektrischen Kräfte mittels Torsion des Aufhängedrahtes die Gleichung:

$$a = K (V_1 - V_2) (V_3 - V_4)$$

unter der Voraussetzung, daß der vom Spalte der Nadel mit dem Spalte der festen Sektoren zum Vorschein kommende Ausschlagwinkel nicht zu klein ist. K ist eine Konstante, die gleich dem doppelten Quotienten aus der Kapazität der Nadel für die Einheit des Ausschlagwinkels durch das Torsionsmoment des Aufhängedrahtes für die Einheit des Winkels ist. Durch diese Anordnung werden die Schwingungen der Nadel aperiodisch.

Als besonders empfindliches Instrument ist noch zu erwähnen:

Das Kapillarelektrometer von Lippmann; dasselbe gestattet, die sehr kleine, den Grenzwert von 0.9 Volt nicht übersteigende Potentialdifferenzen genau zu messen. Das Instrument besteht in der Hauptsache aus einem vertikalen, am unteren Ende in eine feine Öffnung spitz ausgezogenen Glasrohr, das auch oben offen ist und eine durch die Kapillarwirkung am Ausfließen gehinderte Quecksilbersäule enthält. Die Spitze dieses Rohres ist in ein cylindrisches Gefäß eingetaucht, worin sich Quecksilber und 20prozentige Schwefelsäure befindet. Die Elektroden werden durch zwei Platindrähte gebildet, von denen der eine mit der Quecksilbersäule im Rohre, der andere mit dem Quecksilber des unteren Gefäßes verbunden ist. Verbindet man diese Drähte mit einem Leiter, in welchem eine elektromotorische Kraft von geeigneter Stärke wirksam ist, so vergrößert die Polarisation den Wert der Kapillarkonstanten und infolgedessen steigt das Quecksilber im Rohre empor. Die Einstellung der Quecksilbersäule wird mit einem horizontalen Mikroskop von etwa 250facher Vergrößerung beobachtet. Der Nullpunkt

der zum Ablesen des Quecksilberstandes dienenden Skala wird durch Kurzschluß der Quecksilbersäule mit dem Quecksilber des Gefäßes bestimmt. Um die auf die Erhebung der Quecksilbersäule wirkende elektromotorische Kraft mit einer mechanischen Kraft zu vergleichen, bringt man die Quecksilbersäule mittels Luftdruckes zurück; dieser Luftdruck wird mittels eines offenen, zweischenkeligen Quecksilbermanometers gemessen. Man wendet dazu einen mit Luft gefüllten, mittels einer kleinen Schraubenpresse zusammendrückbaren Gummiballon an, der durch Gummischläuche einerseits mit dem offenen Ende des Quecksilberstandrohres, anderseits mit dem einen Schenkel des Manometers verbunden ist. Der Manometerstand wird mittels Tabellen in Volts übersetzt.

100. Kalorimetrische Strommessung. — Man kann die vom Strom erzeugte Wärme entweder direkt auf ein Thermometer einwirken lassen und aus dem Steigen der Quecksilbersäule die Stromstärke berechnen, oder man läßt diese Wärme auf einen Draht einwirken, durch dessen Ausdehnung ein Zeiger bewegt wird, der an einem Teilkreise die Stromstärke anzeigt, oder man bestimmt die vom Strome erzeugte Wärmemenge mittels eines Kalorimeters und berechnet daraus die wirksam gewesene Energie, woraus sich alsdann für den betreffenden Zeitverlauf die mittlere Stromstärke ergiebt.

101. Die Gesetze der kalorimetrischen Messung der Stromstärke. — Bekanntlich entspricht die durch 1 Coulomb bei der elektromotorischen Kraft von 1 Volt entwickelte Arbeit der praktischen Einheit der elektrischen Energie, die als Volt-Coulomb oder Joule bezeichnet wird und gleich 10^7 Ergs ist. Es ist demnach

$$1 \text{ Volt-Coulomb} = 1 \text{ Joule} = \frac{1}{9.81} \text{ Meterkilogramm.}$$

Da ferner 425 Meterkilogramm der Wärmemenge von 1 Kilogramm-Kalorie oder von 1000 Gramm-Kalorien äquivalent sind, so ist:

1 Kilogr.-Kalorie = 4169 Joules
1 Gramm-Kalorie = 4.17 Joules

und

1 Joule = 0.24 Gramm-Kalorie.

Bezeichnet man den Widerstand eines Leiters in Ohms mit R, die Stromstärke in Ampères mit I, und die Zeit der Stromwirkung in Sekunden mit t, so ist die durch den Strom I gegen den Widerstand R in der Zeit t entwickelte elektrische Energie

$$L = I^2 R t \text{ Joules}$$

oder in Gramm-Kalorien ausgedrückt:

$$\frac{L}{J} = 0.24\, I^2 R t \text{ Gramm-Kalorien,}$$

wobei J das entsprechende mechanische Äquivalent der Wärme, das ist: 4.17 Joules bezeichnet.

Es gilt hierbei nach dem Jouleschen Gesetz der Grundsatz, daß in einem Stromkreise, in welchem keine elektromotorische Kraft sich geltend macht, die zwischen zwei Punkten auftretende elektrische Energie in kalorische Wirkung, das ist in Wärme, umgesetzt wird.

Befindet sich der Leitungsdraht in einem Kalorimeter, so ist die an die Flüssigkeit abgegebene Wärmemenge:

$$Q = \frac{L}{J} = \frac{I^2 R t}{4.17} = 0.24\, I^2 R t,$$

und folglich:

$$I^2 = \frac{0.24\, Q}{R t}.$$

Bezeichnet man mit M die Wassermenge des Kalorimeters in Grammen und mit $T_1 - T_0$ die Temperaturerhöhung dieser Wassermenge infolge der vom Strom zugeführten Wärmemenge, so ist $Q = M (T_1 - T_0)$ und folglich:

$$I^2 = \frac{0.24\, P (T_1 - T_0)}{R t}.$$

Bei der Bestimmung der Stromstärke durch die vom Strom erzeugte Wärme kann man in der folgenden Weise verfahren: Eine Spirale aus Neusilberdraht befindet sich in einem kleinen Metallgefäß, das mit Paraffinöl gefüllt ist. Durch den Deckel des Gefäßes geht ein Thermometer so weit hinab, daß dessen Kugel in das Öl eintaucht. Das Thermometer muß sehr genaue Temperaturmessung gestatten. Um die Einwirkung der äußeren Temperatur auf das mit Paraffinöl gefüllte Gefäß möglichst zu beseitigen, ist dasselbe von einem weiten mit Wasser gefüllten Gefäß umgeben, dessen Wasser auf konstanter Temperatur erhalten wird. Der Strom wird mittels eines geeigneten Elektrizitätserzeugers, in dessen Stromkreis ein Galvanometer eingeschaltet ist, durch die im Paraffinöl befindliche Neusilberspirale gesendet und es wird am Galvanometer beobachtet, ob der Strom konstant ist. Während der Strom konstant ist, wird die Temperaturzunahme für kurze Zeiträume, etwa von 5 zu 5 Minuten, gemessen. Hiernach läßt sich eine Kurve konstruieren, deren Abscissen den gleichen Zeitverläufen und deren Ordinaten den dazu gehörigen Temperaturen entsprechen, wobei die nötige Korrektur bezüglich der Abkühlung anzubringen ist. Nach der mechanischen Wärmetheorie folgt: Wenn man als Stromeinheit diejenige Wärmemenge annimmt, die nötig ist, um 1 kg Wasser von 0° C. auf 1° C. zu erhöhen, so wird durch eine Stromstärke von I Ampère, die durch einen Widerstand von R Ohm hindurchgeht, in der Sekunde $0.0143\ A^2\ R$ Kalorien (Wärmeeinheiten) hervorgebracht. Bezeichnet man also die in t Sekunden erzeugte Wärmemenge in Kalorien mit W, so besteht die Gleichung:

$$W = 0.0143\ I^2\ Rt.$$

102. Apparate zur kalorimetrischen Strommessung. — Als kalorimetrischer Strom- und Spannungsmesser für gleichgerichtete und Wechselströme ist von H. Sesemann in Erfurt das in Fig. 74 S. 208 dargestellte Instrument in Vorschlag

gebracht worden *). Dasselbe besteht aus zwei genau übereinstimmenden, mit Skala versehenen Thermometern, deren Quecksilbergefäße cylindrisch geformt sind. Das eine dieser Thermometer wird zur Messung schwacher Ströme mit einer Spirale von Neusilberdraht, für stärkere Ströme mit einer Spirale von Neusilberband umgeben; auch ist es ratsam, im letzteren Falle einen Nebenschluß anzuwenden, dessen Widerstand mit dem Widerstande der Hauptleitung in passendem Verhältnisse steht. An dem betreffenden Thermometer befindet sich noch eine verschiebbare Skala, deren Teilung mittels einer Tangentenbussole oder eines Torsionsgalvanometers durch Versuche empirisch bestimmt ist, so daß man die gesuchten Ampères oder Volts unmittelbar an dieser Skala ablesen kann.

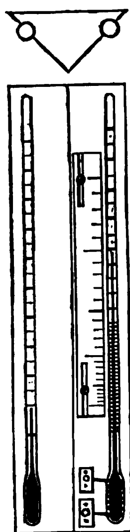


Fig. 74.

Bezeichnet E die elektromotorische Kraft, R den äußeren Widerstand und I die Stromstärke, so ist nach dem Ohmschen Gesetz: $E = IR$, und nach dem Jouleschen Gesetz bestimmt sich die erzeugte Wärme W durch die Gleichung:

$$W = I^2 R.$$

Aus diesen beiden Gleichungen erhält man:

$$E = IR = \sqrt{W} \cdot \sqrt{R}$$

und

$$I = \frac{E}{R} = \sqrt{\frac{W}{R}}.$$

Die Veränderung des Widerstandes durch die Erwärmung des Leiters kann in diesem Falle vernachlässigt werden, da die Eichung des Instrumentes unter denselben Verhältnissen

*) „Elektrotechnische Zeitschrift." Jahrgang 1887. S. 175.

vorgenommen ist, unter denen später die Ablesung erfolgt. Die Wärmemenge W wird mittels des Thermometers bestimmt. Angestellte Versuche ergaben innerhalb der Grenzen der Zimmertemperatur von 7° bis 40° nur Fehler von nicht ganz 1 Prozent.

Zur Messung von Stromstärken wird in der Regel die Hauptleitung direkt an die Klemmen der das Quecksilbergefäß umgebenden Widerstandsspirale angeschlossen; nur bei starken Strömen benutzt man wohl einen Nebenschluß. Zur Messung von Spannungsdifferenzen wird zu der Widerstandsspirale des Thermometers noch ein bifilar gewickelter Widerstand hinzugeschaltet, so daß je nach Umständen 1, 10, 100 2c. Ohm erreicht werden.

Das auf dem kalorimetrischen Prinzip beruhende Voltameter von Cardew wurde bereits auf S. 176 besprochen.

Einundzwanzigstes Kapitel.

Die Energiemesser.

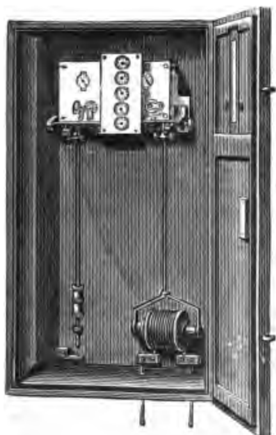
103. **Konstruktionsprinzip der Energiemesser.** — Wenn in einem elektrischen Stromkreise Potentialdifferenz (E) und Stromstärke (I) gleichzeitig veränderlich sind, so fällt dem Energiemesser die Aufgabe zu, das Produkt **E I** zu messen. Der Energiemesser wird deshalb auch Wattmeter genannt. Ein derartiger Apparat muß also die Stärke des Verbrauchsstromes mit dessen Spannung in die geeignete Beziehung bringen. Dies kann in prinzipiell einfacher Weise mittels der kalorimetrischen Messung der Stromwärme (vergl. das vorhergehende Kapitel) oder durch Umsetzung der Stromwärme in Bewegung geschehen. Für diese Art von Messung hat G. Forbes einen Apparat konstruiert, in welchem mittels der durch den Strom erzeugten Wärme ein vertikal aufsteigender Luftstrom erregt wird, der auf ein mit

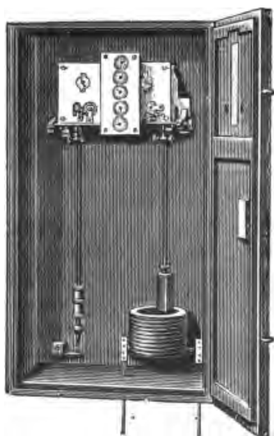
Zählwerk verbundenes leichtes Flügelrad einwirkt. Weder das Kalorimeter noch der Forbessche Flügelradzähler sind aber für die praktische Anwendung geeignet.

Die auf Umsetzung der elektrischen Energie in mechanische Arbeit beruhenden Energiemesser bestehen im wesentlichen aus der Kombination eines Kraft- und eines Zeitmessers, sowie aus einer Vorrichtung zur Bestimmung des Verhältnisses dieser beiden Werte. Auch die elektrolytische Wirkung mittels Metallniederschlags und Wägung der pro Zeiteinheit ausgeschiedenen Metallmenge hat zu gleichem Zweck Anwendung gefunden, jedoch sind die auf diesem Prinzip beruhenden Apparate, wie z. B. das Edisonsche Kupfer- oder Zink-Voltameter, zu wenig zuverlässig. Von Ferranti wurde 1883/84 ein auf elektrodynamischem Prinzip beruhenden Elektrizitätszähler erfunden, der sich aber auch nicht als genügend genau in seinen Angaben erwies. Ein vorzüglicher und sehr verbreiteter Apparat für diesen Zweck ist:

104. **Der Aronsche Elektrizitätszähler,** mit welchem 1884 Prof. Dr. H. Aron in Berlin hervortrat. Dieser in Fig. 75 und 76 als Wattstundenzähler und als Ampèrestundenzähler dargestellte Apparat besteht in der Hauptsache aus einem Uhrwerk, dessen Pendel mit einem Magnet versehen ist, der im Bereich einer elektrischen Drahtspule schwingt und so der magnetischen Wirkung dieser Spule ausgesetzt ist, wodurch der Pendelschlag und somit der Gang der Uhr beeinflußt wird, so daß aus der Zeitdifferenz auf die durch die Spule während eines Zeitverlaufes gegangene Elektrizitätsmenge geschlossen werden kann. Später wurde der Apparat dadurch vervollkommnet, daß er mit zwei Uhrwerken versehen wurde, welche beide auf das Zahlwerk derartig einwirken, daß dasselbe die Zeitdifferenz der Schwingungen der beiden Pendel, von denen das eine frei, das andere aber unter dem Einflusse der elektromagnetischen Spule schwingt, angiebt. Es wurde dadurch der Apparat ganz selbständig

und eine Vergleichung seiner Angaben mit einer gewöhnlichen Uhr unnötig gemacht. Schwingen beide Pendel gleichmäßig, so bleibt das Zählwerk in Ruhe und zeigt somit an, daß kein Strom durch die Spule geht. Sobald jedoch ein Elektrizitätsstrom in der Spule wirksam ist, wird das über der Spule hängende Pendel durch die magnetische Einwirkung des Stromes in seiner Schwingung beschleunigt und das


Fig. 75.


Fig. 76.

Zählwerk giebt den Unterschied der beiden Pendelschläge in Einern, Zehnern, Hundertern ꝛc. an.

Durch die Eichung des Instrumentes wird ein Koeffizient bestimmt, mit welchem die Angaben des Zählwerkes zu multiplizieren sind, um den Elektrizitätsverbrauch in Ampèrestunden zu erhalten. Ist dieser Faktor gleich Eins, so kann man diese Werte direkt ablesen. Die Uhren des Apparats laufen etwa 40 Tage und es werden die Apparate von 50 bis zu 4000 Ampères gebaut. Auch für das Dreileiter- und

Fünfleitersystem kann das Prinzip des Aronschen Elektrizitätszählers benutzt werden. Für das Dreileitersystem erhält der Apparat zwei Drahtspulen und die über den Rollen schwingenden Magnetpole sind entgegengesetzter Natur. Für das Fünfleitersystem wird der Apparat mit vier Drahtrollen und zwei Magneten versehen.

Es ist aber der Apparat auch noch in der Weise eingerichtet worden, daß man den Elektrizitätsverbrauch direkt in Voltampère- oder Wattstunden ablesen kann. Fig. 76 zeigt diese Einrichtung. Auch hierbei sind zwei Pendel angeordnet, an Stelle des permanenten Magnets trägt aber das elektrisch beeinflußte Pendel eine dünndrahtige Spule, die im Nebenschluß zur Hauptleitung liegt und über einer Drahtrolle schwingt, durch welche der zu messende Verbrauchsstrom geführt ist. Auf diese Weise wird eine Veränderung in der Schwingungsdauer des Meßpendels hervorgerufen, welche dem Produkt der jeweiligen in der Hauptleitung herrschenden Spannung und Stromstärke proportional ist. Diese Type des Aronschen Elektrizitätsmessers wird von 12 bis zu 1000 Ampères und für Spannungen bis über 125 Volt ausgeführt.

105. **Der Schuckertsche Elektrizitätsmesser**, der sich ebenfalls durch Einfachheit in der Einrichtung und durch zuverlässige Wirkungsweise auszeichnet, ist in Fig. 77 schematisch im Grundriß dargestellt.

Der Apparat besteht aus einem kleinen Elektromotor **M**, der von der Lampenleitung aus betrieben wird und der seinerseits wieder eine Kupferscheibe **K** betreibt, die vor den Polen eines Elektromagnets **E** rotiert, so daß in derselben als Gegenkraft Wirbelströme (Foucaultströme) erregt werden, die bremsend auf den Elektromotor einwirken. Der Elektromotor selbst ist ganz ohne Eisen hergestellt, um alle störenden magnetischen Einwirkungen der Hysterosis zu vermeiden. Sein Anker **A** ist in Nebenschluß zur Lampenleitung $L_1 L_2$ geschaltet, während seine Feldspulen den zu messenden Verbrauchsstrom führen. Die Zusatzwickelung der Feldspulen

des Motors hat den Zweck, die Fehler der mechanischen Widerstände zu beseitigen, während die Fehler, welche durch die elektromotorische Gegenkraft des Motorankers entstehen, dadurch auf ein Minimum gebracht werden, daß die Wickelungen des bremsenden Elektromagnets E hinter die

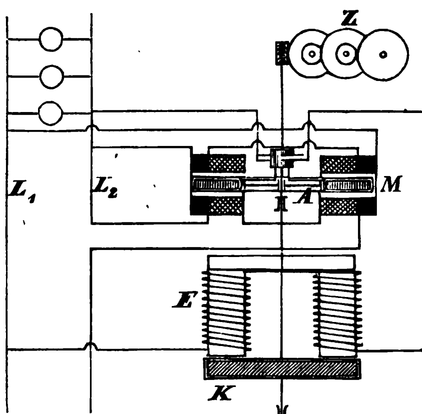


Fig. 77.

Ankerwickelung des Motorankers geschaltet sind. Die Motorwelle wirkt auf ein Zählwerk Z ein. Die Empfindlichkeit dieses Elektrizitätsmessers ist so groß, daß er bereits bei 1 Proz. der Maximalstärke zu arbeiten beginnt und seine Genauigkeit ergiebt sich aus der Thatsache, daß bei angestellten Messungen der Maximalfehler noch nicht 1.5 Proz. betrug, so daß dieser Apparat den Anforderungen der Praxis vollständig entspricht.

106. **Der Ampèrestundenzähler von Siemens & Halske,** der neuerdings in den Betrieb der elektrischen Zentralanlagen eingeführt worden ist, beruht auf dem folgenden Prinzip: Ein leichter, passend gekrümmter Hebel aus Aluminium wird durch ein Uhrwerk aus seiner Ruhelage periodisch gegen die

Schneide eines Strommessers bewegt. Der von dem Hebel bei dieser Bewegung beschriebene Drehwinkel wird auf ein Zahnrad und durch dieses auf ein Zählwerk übertragen. Die Krümmung des Hebels auf der gegen den Zeiger stoßenden Seite ist derartig, daß der vom Hebel durchlaufene Winkel stets proportional der Stromstärke ist. Ein Gegengewicht zieht den Zeiger nach dem Hebel, während eine durch das Uhrwerk bewegte Exzenterscheibe den Hebel alle 2.5 Minuten vom Zeiger entfernt, aber dann sofort wieder dem Zuge des Gegengewichts überläßt. Das als Strommesser dienende System ist sehr einfach. Der zu messende Strom durchfließt in den Windungen W (Fig. 78 und 79) einen zwischen Spitzen gelagerten, mit dem Zeiger fest verbundenen Kern e aus Weicheisen von länglich elliptischem Querschnitt, während ein die Stromwindungen umfassender Stahlmagnet m ein konstantes magnetisches Feld ergiebt, wodurch der Kern e bei stromloser Windung W eine feste Ruhelage erhält und den Zeiger z auf den Nullpunkt der Skala einstellt.

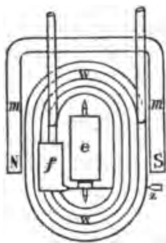


Fig. 78.

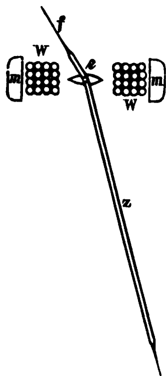


Fig. 79.

Zweiundzwanzigstes Kapitel.

Einige praktische Maßmethoden.

107. Messung der Stromstärke. — Man schaltet das Galvanometer G (Fig. 80) bei schwachen Strömen direkt, oder bei stärkeren Strömen mittels Nebenschlusses in den Strom=

kreis ein, so daß im letzteren Falle nur ein geringer Bruchteil des Stromes durch das Galvanometer geht, etwa 0.01 oder 0.001 der Stromstärke. Das aus der Leitung des Hauptstromkreises abgegrenzte Stück a b wird alsdann von einem Strome durchflossen, dessen Stärke, nach dem Kirchhoffschen Gesetz, um den Bruchteil des durch den Nebenschluß oder Shunt fließenden Stromes verringert ist. Im Nebenschluß

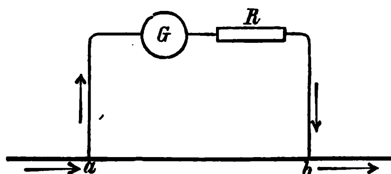


Fig. 80.

befindet sich das Galvanometer G mit starkem Widerstande und außerdem ein Regulierwiderstand R (Widerstandskasten) eingeschaltet.

Ist r der Widerstand des Galvanometers an sich, R der einregulierte Nebenwiderstand und R_1 der Widerstand in dem abgegrenzten Teile a b der Hauptleitung, ist ferner i die Stromstärke im Nebenschluß, $I_1 = I - i$ die Stromstärke im Teile a b und e die Potentialdifferenz zwischen den Anschlußpunkten a und b des Nebenschlusses, so ist

$$e = (R + r)\, i = R_1\, I_1,$$

woraus folgt:

$$I_1 = \frac{R + r}{R_1} = i.$$

Nun ist aber die gesuchte Stromstärke in der Leitung AB, das ist die Stärke I des Hauptstromes, gleich $I_1 + i$, folglich ist

$$I = i + \frac{R + r}{R_1}\, i = \left(1 + \frac{R + r}{R_1}\right) i.$$

Benutzt man ein Galvanometer von sehr großem Widerstande, z. B. von 2000 bis 3000 Ohms, so kann man in der obigen Gleichung den sehr kleinen Wert i gegen den Wert $\frac{R + r}{R_1}$ i unberücksichtigt lassen, so daß man erhält:

$$I = \frac{e}{R_1} \text{ oder } e = I R_1,$$

d. h.: die Potentialdifferenz zwischen den Punkten a und b ist gleich dem Produkt aus der Stärke des Hauptstromes und dem Widerstande im Shunt ab, so daß man also in diesem Falle die Potentialdifferenz oder elektromotorische Kraft e mit einem Galvanometer messen kann, dessen Skala, anstatt in Ampères, in Volts geteilt ist.

108. Messung der Konstanten eines galvanischen Elementes. — Unter Konstanten eines galvanischen Elementes versteht man dessen elektromotorische Kraft, inneren Widerstand und Stromstärke, obschon diese Größen während der Wirkungszeit eines galvanischen Elementes keineswegs konstant sind, sondern infolge der Polarisation, der Veränderung der elektrolytischen Flüssigkeit und aus anderen Ursachen mehr oder minder sich ändern. Die Methoden der Messung dieser sogenannten Konstanten sind sehr verschieden.

Die Wirkung eines galvanischen Elementes hängt von dessen elektromotorischer Kraft E und dessen innerem Widerstande W ab. Arbeitet das Element gegen den äußeren Widerstand w, so ist die Stärke des vom Element gelieferten Stromes

$$I = \frac{E}{W + w}.$$

In der Praxis ist die Stromstärke I die Größe, durch welche die Leistungsfähigkeit eines Elementes bestimmt wird, indem dieselbe von der Größe der Elektroden abhängig ist, während die elektromotorische Kraft von der chemischen Natur der Elektroden bedingt wird.

Bei einem galvanischen Elemente muß die elektromotorische Kraft aus zwei Gesichtspunkten betrachtet werden, jenachdem der Stromkreis offen oder geschlossen ist, oder auch schon eine Zeit lang geschlossen war. In allen Fällen ist die elektromotorische Kraft gleich der Summe der Potentialdifferenzen an den Berührungsflächen der verschiedenen Bestandteile, die das Element bilden. Ist aber das Element von einem Strome durchflossen worden, so hat die chemische Arbeit infolge der Polarisation die Potentialdifferenzen an den Berührungsstellen geändert, und die wirkliche elektromotorische Kraft hat einen anderen Wert angenommen, der aber gerade deshalb für die Praxis wichtig ist, weil dadurch allein die Stromstärke bedingt wird.

Die Messung der elektromotorischen Kraft eines offenen, das ist stromlosen galvanischen Elementes läßt sich nach der zuerst von Poggendorff angewendeten Kompensationsmethode ausführen. Unter Kompensationsmethoden im allgemeinen versteht man die Messungsweisen, wobei die zu bestimmende elektromotorische Kraft durch die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten eines von einem dauernden Strome durchflossenen Stromkreises aufgehoben, das ist kompensiert wird.

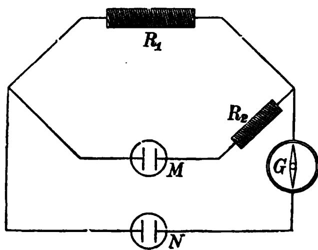


Fig. 81.

Die Poggendorffsche Kompensationsmethode ist in Fig. 81 dargestellt.

In den Stromkreis eines Normalelementes M, dessen konstante elektromotorische Kraft E bekannt ist, werden zwei Regulierwiderstände (Rheostaten) R_1 und R_2 eingeschaltet. Als Normalelement benutzt man ein Daniell-Element, dessen Beschreibung im Abschnitt über galvanische Elemente gegeben ist.

Das zu messende Element N, dessen elektromotorische Kraft e noch zu bestimmen ist, ist mit einem Galvanometer G in einer Zweigleitung mit dem Stromkreis des Normalelementes verbunden.

Bezeichnet man mit R den Widerstand im Stromkreise des die Rheostaten enthaltenden Normalelementes M und mit r den Widerstand in der das zu messende Element N nebst Galvanometer enthaltenden Zweigleitung, so ist:

$$\frac{e}{E} = \frac{r}{R + r}.$$

Will man die Bestimmung der Widerstände R und r_1, von denen besonders der erstere schwierig zu bestimmen ist, vermeiden, so braucht man dieselben nur durch andere Größen der Widerstände, die mit R_1 und r_1 bezeichnet sind, zu ersetzen, wobei von neuem der Stromwert auf Null gebracht wird. Man hat dann

$$\frac{e}{E} = \frac{r}{R + r} = \frac{r_1}{R_1 + r_1} = \frac{r_1 - r}{R^1 - R + r^1 - r} = \frac{1}{1 + \frac{R^1 - R}{r^1 - r}}$$

womit das Verhältnis der elektromotorischen Kräfte durch die Änderungen der Widerstände in den beiden Rheostaten gegeben ist.

Die Bestimmung der elektromotorischen Kraft in dem geschlossenen Elemente wird nach Poggendorff in der folgenden Weise nach Fig. 82 ausgeführt.

Das Normalelement M und das zu messende Element N sind in demselben Stromkreise befindlich, so daß ihre elektromotorischen Kräfte sich addieren. Zwischen beide ist ein Zweig A B mit einem Galvanometer G und eventuell zwei Widerständen R und R_1 geschaltet. Der Punkt A wird beliebig gewählt; dann verschiebt man B, oder ändert die Widerstände so, daß der Strom in dem Zweige A B Null ist. Alsdann verhalten sich die Widerstände R und R_1 oder

die beiden Teile A M B und A N B zu einander wie die elektromotorischen Kräfte.

Ohne die Lage des Punktes B zu ändern, fügt man zu den beiden Teilen des Zweiges, dessen Widerstände R und R_1 sind, noch bezw. solche Widerstände r und r_1 hinzu, daß der Strom wieder Null wird, und erhält dann, ohne daß

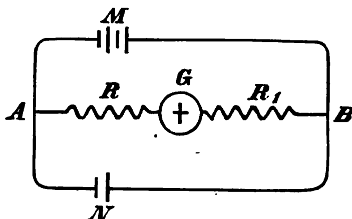


Fig. 82.

man die Widerstände R und R_1 der Kreise, welche die elektromotorischen Kräfte enthalten, zu kennen braucht, für die zu messende elektromotorische Kraft e aus der bekannten elektromotorischen Kraft E und den bekannten Widerständen r und r_1 die Gleichung:

$$\frac{E}{E_1} = \frac{R}{R_1} = \frac{R + r}{R_1 + r_1} = \frac{r}{r_1}.$$

Die gebräuchlichste und genaueste Messungsmethode zur Bestimmung von elektromotorischen Kräften wird mit Galvanometern von großem Widerstand ausgeführt, weil die Empfindlichkeit dieser Instrumente fast unbegrenzt und die Messung damit am schnellsten auszuführen ist. Wenn der Widerstand r, der den Stromkreis des Elementes schließt, sehr groß ist gegen dessen inneren Widerstand, so geht die Gleichung

$$E = I(R + r) = Ir\left(1 + \frac{R}{r}\right),$$

infolge der Annäherung des Bruchwertes $\frac{R}{r}$ an Null, über in

$$E = I\,r$$

und man erhält folglich zur Vergleichung zweier elektromotorischen Kräfte die Gleichung:

$$\frac{E_1}{E} = \frac{I_1\,r_1}{I\,r},$$

und somit ist das Verhältnis der elektromotorischen Kräfte, bei Gleichheit der Widerstände r und r_1, gleich dem Verhältnis der beobachteten Stromstärken oder, wenn letztere gleich sind, gleich dem Verhältnis der Widerstände.

Man schließt die zu vergleichenden Widerstände durch einen konstanten Widerstand von 30 bis 40 tausend Ohm, indem man nötigenfalls noch einen Shunt (vergl. Fig. 80) an das Galvanometer anlegt. Bei Spiegelgalvanometern sind dann die elektromotorischen Kräfte den Ablenkungen proportional.

109. Prüfung von Leitungskabeln. — Es sind bei der Untersuchung von Leitungskabeln vier Prüfungen auszuführen; nämlich

1. Die Prüfung auf Isolationswiderstand;
2. die Prüfung auf Kapazität;
3. die Lokalisierung der Fehler in einem auf die Trommel aufgewundenen Kabel, d. h. im Kabelringe;
4. Messung der Leitungsfähigkeit des Kabelkupfers.

In den Figuren 83 bis 86 sind diagrammatisch diese vier Prüfungsmethoden dargestellt.

Fig. 83 Prüfung auf Isolation. Batterie B, Galvanometer G, bekannter Widerstand R (1 000 000 Ohms) und Kabel K sind hintereinander geschaltet. Durch Kurzschluß der Kabellänge b wird das Galvanometer kalibriert, d. h.: es wird ihm ein dem Widerstand R entsprechender Widerstand vorgeschaltet, damit nur ein geringer Stromteil in das Galvanometer eintritt und nicht zu starke Ablenkungen

erhalten werden. Dann wird durch Ausstöpseln (d. h. Ausschalten) des Kabelleiters und Kurzschluß des Widerstandes R die Isolation gemessen.

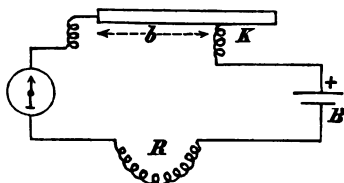


Fig. 83.

Bei der durch Fig. 84 dargestellten Prüfung der Kapazität verfährt man in ganz ähnlicher Weise, nur ist anstatt des Widerstandes R ein Kondensator C, sowie ein Entladungsdraht S nebst Schlüssel eingeschaltet.

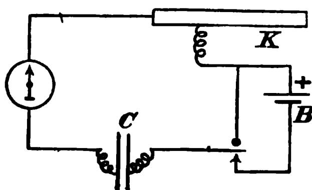


Fig. 84.

Die Anordnung für die Lokalisierung der Fehler in einem Kabelringe zeigt Fig. 85 S. 222. Die beiden Enden des Kabelkupfers sind mit den zwei Enden eines Drahtes mn einer Wheatstoneschen Brücke verbunden, so daß sie mit diesem Brückendrahte die vier Arme einer gewöhnlichen Wheatstoneschen Brücke bilden. Der Fehler im Kabel, d. h. der etwa lokal stattfindende Kontakt zwischen Kupfer und Bleiumhüllung, oder zwischen Kupfer und Wasserbad, wird durch

Anlegen des positiven Batteriedrahtes an die Kabelumhüllung, bezw. durch Einsenken dieses Drahtes in das Wasserbad durch den Ausschlag des Galvanometers erkannt, welcher Ausschlag zum Maximum wird, wenn der Batteriedraht die Stelle des Fehlers berührt.

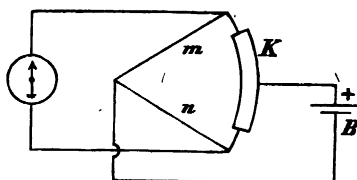


Fig. 85.

Fig. 86 zeigt die Anordnung für die Prüfung der Leitungsfähigkeit des Kupfers in einem Kabel. Diese Anordnung entspricht derjenigen der einfachen Wheatstoneschen Brücke, in deren einen Zweig das Kabel K als zu untersuchender Widerstand eingeschaltet ist.

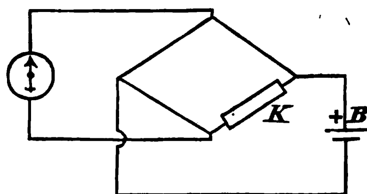


Fig. 86.

In der Praxis werden diese vier Anordnungen derartig auf einem Tisch kombiniert, daß alle Verbindungen fest sind und immer nur beim Übergange von einer Prüfung zur anderen eine Verbindung durch einfaches Umstöpseln entsprechend zu verändern ist.

110. Energiemessung bei Wechselströmen mittels des Elektrometers. — In Fig. 87 sind AA BB die vier Quadranten und C die um die Rotationsachse o schwingende Nadel des Thomsonschen Quadrantenelektrometers (S. 197). Werden die Quadranten AA mit einem bestimmten Potential A, die Quadranten BB mit einem anderen bestimmten Potential B und endlich ebenso die Nadel C mit einem Potential C geladen, so wird im allgemeinen auf die Nadel eine Wirkung

$$D = a(A - B)(C - \tfrac{1}{2})(A + B)$$

ausgeübt. Verbindet man nun die Quadrantenpaare wie

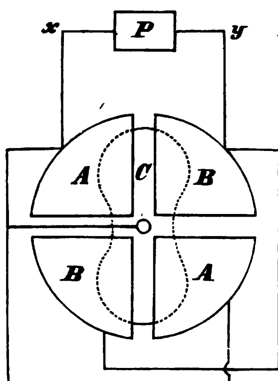


Fig. 87.

in Fig. 87, so daß AA mit dem Pol x einer Stromquelle P, BB mit dem anderen Pole y dieser Stromquelle verbunden ist, und legt man zugleich auch die Nadel C an diesen Punkt an, so wird A = — B und C = A und die obige Formel erhält die einfachere Form

$$D = a\,(A - B)\,A.$$

Wird ferner noch das Quadrantenpaar BB mit der Erde verbunden, so daß dessen Potential gleich Null wird, so ergiebt sich

$$D = a\,A^2.$$

Auf dieser Formel beruht aber die Anwendung des Quadrantenelektrometers hinsichtlich der Messung elektromotorischer Kräfte von Wechselströmen. Das quadratische Glied A^2 besagt, daß der Wechsel in dem Vorzeichen des Potentials keinen Einfluß auf den Nadelausschlag des Instrumentes hat, sondern die Nadel giebt stets den

Ausschlag in demselben Sinne, so daß D sein Vorzeichen nicht ändern kann.

Infolge dieser einfachen Bestimmungsweise ist das Quadrantenelektrometer besonders gut als Meßinstrument für hohe Spannungen geeignet; es ist auch dabei keine Selbstinduktion in Rechnung zu ziehen, indem die Wirkung statischer Natur ist.

Um die Energie von Wechselströmen zu bestimmen ist das Produkt aus der gleichzeitig herrschenden mittleren Spannung und Stromstärke zu bilden. Dies kann aber geschehen, wenn man Strom und Spannung gleichzeitig in direktes Zusammenwirken bringt. Fig. 88 deutet die prinzipielle Lösung dieser Aufgabe an. P ist die Stromquelle, von welcher der eine Pol x mit dem Quadrantenpaare B B verbunden ist und somit zwischen B B und der mit dem entgegengesetzten Pol y verbundenen Nadel die gesamte Spannungsdifferenz der Stromquelle ergiebt, während der Punkt Q mit dem Quadrantenpaare A A verbunden ist, so daß zwischen den beiden Quadrantenpaaren A A und B B eine Spannungsdifferenz zum Ausdruck kommt, die um so größer, je größer der Widerstand Qx = R ist. Bei gegebenem Widerstand R kann demnach diese Spannungsdifferenz als Maß der Stromstärke dienen. Dieser Widerstand muß für Wechselstrommessungen ganz induktionsfrei sein und ist deshalb aus einer bifilar bewickelten Spule zu bilden; auch ist er so zu wählen, daß der Spannungsabfall eine verhältnismäßige Größe hat, weil bei zu geringem

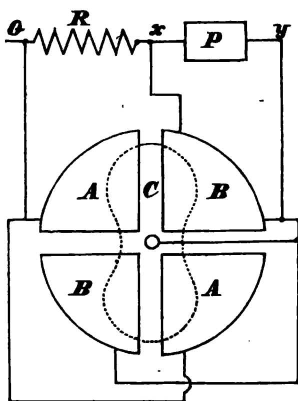


Fig. 88.

Spannungsabfall das Instrument zu wenig empfindlich ist, während ein zu großer Spannungsabfall Ungenauigkeit im Gefolge hat.

Nimmt man zwei gleiche induktionsfreie Widerstände, wie dies Fig. 89 darstellt, so kann man an dem Quadrantenelektrometer die vom Wechselstrom ausgeübte Energie direkt ablesen. Die Quadranten A B, $A_1 B_1$ sind mit den Potentialen der Punkte Q und x, bezw. der Punkte y und x + y verbunden. Somit ist in den Quadranten B und A_1 die ganze Potentialdifferenz vorhanden, welche die mit dem einen Pol verbundene Nadel C zum Ausschlag bringt. Dieser Ausschlag wird aber teilweis durch die Ladungen von A und B_1 aufgehoben, weil diese Quadranten mit der um den Spannungsabfall in den Widerständen Q x und y (x + y) verminderten Spannung geladen sind, so daß der wirkliche Ausschlag der Nadel als Maß für die Energie dienen kann.

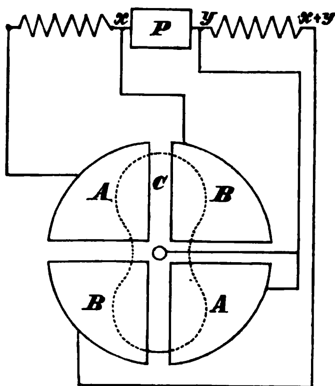


Fig. 89.

Um den infolge der Einwirkung ungleicher Ladungen der Quadranten hervorgerufenen seitlichen Zug, welcher die Genauigkeit des Instrumentes stark beeinflussen würde, wegzubringen, hat Swinburne, von dem die hier beschriebene Meßmethode in Vorschlag gebracht worden ist, dem Elektrometer die in Fig. 90 S. 226 dargestellte Form gegeben, wobei die eingeschriebenen Buchstaben dieselbe Bedeutung haben, wie oben.

111. Bestimmung der elektromotorischen Kraft mittels Kondensators. — Die Benutzung des Kondensators zur Bestimmung der elektromotorischen Kraft zeigt Fig. 91. E ist das auf seine elektromotorische Kraft zu untersuchende Element, G ein Galvanometer (etwa Thomsons Konstruktion) mit einem Widerstande R von 10 000 Ohms; C ist der Kondensator, der als ein sogenanntes Mikrofarad mit Zehntelteilung eingerichtet ist. Man stellt den Reguliermagnet des Galvanometers so ein, daß für eine Kapazität von 0.3 bis 0.6 Mikrofarad 100 Teilungen der Galvanometerskala 1 Volt entsprechen. Legt man den Umschalterhebel S nach links, so wird der

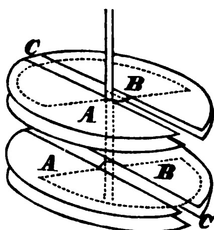


Fig. 90.

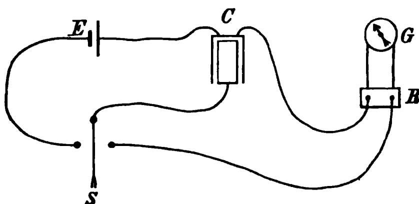


Fig. 91.

Kondensator geladen, legt man den Umschalterhebel nach rechts, so wird die Kondensatorladung durch das Galvanometer gesendet.

Sechster Abschnitt.

Die galvanischen Elemente.

Dreiundzwanzigstes Kapitel.

Energieerzeugung durch Kontakt und chemische Wirkung.

112. Wirkungsweise der Voltaschen Elemente. — Die Voltaschen Elemente beruhen zumteil auf der Wirkung der Berührungs- oder Kontaktelektrizität, zumteil auf der Wirkung chemischer Energie.

Das Auftreten der Berührungselektrizität wurde von Volta nachgewiesen.

Die Erregung der Berührungselektrizität erfolgt dadurch, daß zwei verschiedenartige leitende Körper bei der gegenseitigen Berührung in entgegengesetzte elektrische Zustände übergehen, d. h.: der eine Körper positiv elektrisch, der andere Körper negativ elektrisch geladen wird. Bei augenblicklicher Berührung ist der größte Teil der erregten Plus-, bezw. Minus-Elektrizität an der Berührungsstelle, entsprechend deren Flächengröße, gebunden. Zwei entsprechende Körper werden stets und immer wieder durch gegenseitige Berührung elektrisch erregt, vorausgesetzt, daß denselben stets vor der wiederholten Berührung ihre elektrische Ladung entzogen worden ist. Diese Art der Elektrizität wird auch nach deren ersten Entdecker, dem italienischen Arzte Luigi

Galvani, als galvanische Elektrizität bezeichnet, doch stellte Volta zuerst eine Theorie derselben auf.

Zur Erzeugung der Berührungselektrizität sind besonders die Metalle geeignet. Den mehr oder minder starken Gegensatz zweier elektrisch erregter Körper nennt man deren Potentialdifferenz oder elektrische Spannung, und mit Bezug auf die bei der gegenseitigen Berührung eintretende Größe dieser Potentialdifferenz oder Spannung hat man die Metalle und noch andere feste Körper in einer sogenannten Spannungsreihe geordnet, in der jeder einzelne Körper in Berührung mit irgend einem andern, ihm in der Reihe folgenden Körper positiv, der folgende aber negativ elektrisch wird, und zwar tritt diese Potential- oder Spannungsdifferenz zwischen zwei Körpern der Spannungsreihe um so stärker auf, je weiter die beiden Körper in der Spannungsreihe von einander entfernt sind. Selbstverständlich ist vorausgesetzt, daß die Ordnung der Körper in der Spannungsreihe nur Geltung hat, so lange die Körper sich unter sonst gleichen Umständen befinden, indem nicht nur Temperaturverschiedenheiten, sondern auch die innere und äußere Beschaffenheit des sonst gleichen Materials &c. maßgebend für die Größe der bei der Berührung eintretenden Spannungsdifferenz sind. Eine derartige Spannungsreihe ist die folgende:

+ Natrium	Aluminium	Silber
Magnesium	Messing	Quecksilber
Zink	Nickel	Gold
Blei	Wismut	Platin
Zinn	Kupfer	Graphit
Eisen	Antimon	— Braunstein.

Übrigens ist zu bemerken, daß oxydierte Metalle sich anders verhalten als reine Metalle. Die in obiger Tabelle aufgeführten Körper sind Leiter erster Ordnung.

Nach dieser Tabelle wird z. B. Kupfer in Berührung mit Blei stärker negativ elektrisch als in Berührung mit Eisen, noch stärker negativ elektrisch mit Zinn und noch

stärker mit Zink, dagegen wird Kupfer positiv elektrisch in Berührung mit Silber, stärker mit Gold und noch stärker mit Platin oder gar mit Braunstein. Es wird diese Thatsache als das erste Gesetz der Spannungsreihe bezeichnet.

Ferner haben Ayrton und Perry für die Potentialdifferenzen oder elektromotorischen Kräfte in Volts verschiedener Metallpaare die folgende Tabelle aufgestellt.

Zink / Blei	0.210 Volt
Blei / Zinn	0.069 "
Zinn / Eisen	0.313 "
Eisen / Kupfer	0.146 "
Kupfer / Platin	0.238 "
Platin / Kohle	0.113 "

Die Potentialdifferenz zwischen je zwei Metallen dieser Reihe ist gleich der Summe aller dazwischen befindlichen Potentialdifferenzen, also zwischen Zink und Kohle gleich 1.089 Volts.

Übrigens werden auch Potentialdifferenzen bei der Berührung zweier verschiedener Flüssigkeiten, sowie bei der Berührung einer Flüssigkeit mit einem Metall erzeugt. Ein Stück erhitztes Metall in Berührung mit einem Stück kalten Metalls derselben Art ergiebt ebenfalls eine Potentialdifferenz, und selbst durch die gegenseitige Berührung von Nichtleitern (Dielektrika) wie etwa Glas und Siegellack können Potentialdifferenzen zum Vorschein gebracht werden.

Als zweites Gesetz der Spannungsreihe gilt die Thatsache, daß die Spannungsdifferenz zwischen zwei Gliedern der Spannungsreihe bei gleicher Temperatur ein

und dieselbe ist, gleichviel ob die Glieder unmittelbar mit einander in Berührung gebracht, oder durch andere beliebig viele und beliebig angeordnete Glieder der Spannungsreihe mittelbar mit einander leitend verbunden sind.

Wenn also z. B. das eine Mal eine Kupferplatte unmittelbar mit einer Zinkplatte in Berührung gebracht wird, das andere Mal aber zwischen die Kupfer- und Zinkplatte eine beliebige Anzahl von anderen, in beliebiger Reihenfolge angeordneten Platten aus anderen Materialien der obigen Spannungsreihe gelegt werden, so werden die auf den beiden Endplatten, das ist auf der Kupfer- und auf der Zinkplatte sich ansammelnden Kontaktelektrizitäten in beiden Fällen, unter sonst gleichen Umständen, dieselbe Beschaffenheit und Spannungsdifferenz besitzen.

Zur Erzeugung von Elektrizität durch Kontakt dient die Zambonische sogen. trockene Säule. Dieselbe besteht aus einer großen Anzahl übereinandergelegter, einerseits mit Zinnfolie, anderseits mit Mangansuperoxyd überzogener kreisrunder Papierscheiben. Die auf diese Weise aus mehreren Tausend solcher Papierscheiben oder Elemente gebildete Säule befindet sich innerhalb eines in seiner Weite dem Durchmesser der Scheiben entsprechenden Glasrohr. Der innere Widerstand einer solchen elektrischen Säule ist sehr bedeutend, weil die Leitung auf der inneren, natürlichen Feuchtigkeit des Papiers beruht und dieser Feuchtigkeitsgrad an und für sich sehr gering ist. Dagegen ist die Potentialdifferenz oder elektromotorische Kraft einer solchen Säule verhältnismäßig sehr groß, so daß eine gute trockene Säule sogar Funken bei der Verbindung ihrer Enden (Pole) zu liefern vermag. Allmählich unterliegen jedoch die Metallüberzüge der die Säule bildenden Papierscheiben einer Veränderung, wodurch die Säule nach und nach ihre Wirksamkeit verliert; doch kann dieselbe bei guter Herstellung und geeigneter Aufbewahrung viele Jahre aushalten, bevor das Zinn vollständig oxydiert und das Mangansuperoxyd

reduziert worden ist. Im physikalischen Laboratorium der Oxforder Universität war eine solche trockene Säule vorhanden, deren Pole mit zwei Metallglocken in Verbindung stehen, zwischen denen eine kleine Metallkugel an einem Faden hängt, die durch Hin- und Herschwingen die Elektrizität langsam entladet. Durch Anschlagen dieser Kugel wurden diese Glocken, zur Zeit des Berichtes, schon seit mehr als vierzig Jahren ununterbrochen im Tönen erhalten.

Eine ähnliche Säule, bei der aber die Feuchtigkeit als Leiter eine auffälligere Rolle spielt, hat Volta konstruiert. Dieser Elektrizitätserzeuger wird als nasse Säule bezeichnet und sie bildet den Übergang zu den sogen. galvanischen Batterien, bei deren Wirksamkeit chemische Prozesse in sehr bemerkenswerter Weise hervortreten.

Die Voltasche nasse Säule ist aus kreisrunden Kupfer- und Zinkplatten mit Zwischenlagen von angefeuchtetem starken Löschpapier oder Flanellscheiben aufgebaut. Zwischen je einer auf einander folgenden Kupfer- und Zinkscheibe befindet sich eine derartige mit Salzwasser schwach angefeuchtete Zwischenlage. Die Säule hat einen Kupfer- und einen Zinkpol. Obschon das Kupfer bei dieser Anordnung das negative und das Zink das positive Metall ist, so wird doch der Kupferpol als der positive (+) Pol und der Zinkpol als der negative (—) Pol bezeichnet, weil infolge der elektrischen Erregung die freiwerdende positive Elektrizität sich am Kupferpol und die freiwerdende negative Elektrizität sich am Zinkpol ansammelt.

Die zwischen je einer Kupferplatte und einer Zinkplatte der Säule hervortretende Potentialdifferenz summiert sich nach den Plattenpaaren, so daß also eine z. B. aus 50 Plattenpaaren oder Elementen gebildete Säule eine 50mal so starke Potentialdifferenz an ihren Enden aufweist, als die Größe der Potentialdifferenz bei einem Plattenpaare beträgt.

113. Wirkungsweise der eigentlichen galvanischen Elemente oder Hydro-Elemente. — Bei den sogenannten galvanischen

Elementen (Hydro-Elementen oder Ketten) wird die als elektrische Arbeit auftretende Energie durch chemische Wirkung verursacht. Und zwar gestaltet sich die Erscheinung in der folgenden Weise.

Bei der direkten Berührung von beispielsweise einer Kupfer- und einer Zinkplatte (Fig. 92) wird die negative Elektrizität auf dem Kupfer und die positive Elektrizität auf dem Zink nach dem ersten Gesetze der Spannungsreihe abgeschieden. Anders gestaltet sich jedoch die Sache, wenn zwischen Kupfer und Zink eine Flüssigkeit sich befindet, durch welche die elektrische Erregung hindurchgehen muß. Diesen Fall illustriert Fig. 93. Hierbei ladet sich die Kupferplatte

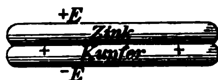


Fig. 92.



Fig. 93.

in umgekehrter Weise mit positiver und die Zinkplatte mit negativer Elektrizität. Dieses verschiedene Verhalten liegt in der Mitwirkung der Flüssigkeit. Bei der Berührung von Kupfer mit der Flüssigkeit scheidet sich die positive Elektrizität in der Flüssigkeit (z. B. in ungesäuertem Wasser), die negative im Kupfer ab. Ganz ähnlich ist das Verhalten bei der Berührung zwischen Zink und Flüssigkeit. Indessen ist die elektrische Erregung zwischen Zink und Flüssigkeit stärker als zwischen Kupfer und Flüssigkeit. Die freie positive Elektrizität der Flüssigkeit tritt also einerseits auf das Zink, anderseits auf das Kupfer über, gleichzeitig bewirkt jedoch auch die positive Elektrizität der Flüssigkeit eine Ausscheidung von negativer Elektrizität am Zink und Kupfer; es ist jedoch die Menge der von der Flüssigkeit an das Kupfer abgegebenen positiven Elektrizität größer als die im Kupfer abgeschiedene negative Elektrizität, während bezüglich des Zinks gerade

das umgekehrte stattfindet, weshalb am Kupfer die positive, am Zink die negative Elektrizität unter diesen Umständen überwiegt. Die in einer solchen Kombination befindlichen Leiter der ersten Ordnung werden Elektroden genannt und die Kombination selbst heißt ein Volta-Element. Wird in einem solchen Element die freie Elektrizität der einen Elektrode nach der Erde abgeleitet, so verdoppelt sich die elektrische Spannung auf der andern Elektrode.

Werden die festen Bestandteile eines Volta-Elementes (z. B. der dasselbe bildenden Kupfer- und Zinkplatte) durch einen Metalldraht verbunden (Fig. 94), so tritt zu den durch Berührung der Flüssigkeit (dem Elektrolyt) mit den Metallen erregten elektromotorischen Kräften noch die durch Berührung dieser beiden Metalle erregte bedeutende Kraftwirkung hinzu und es erfolgt eine Bewegung des elektrischen Fluidums durch den Draht, indem die vorher getrennten Elektrizitäten sich kontinuierlich wieder vereinigen und durch die elektromotorische Kraftwirkung unaufhörlich neue Mengen der gebundenen Elektrizitäten geschieden werden. Auf diese Weise entstehen zwei sich begegnende elektrische Ströme, ein positiver Strom, der seinen Weg vom Kupfer durch den Schließungsdraht nach dem Zink und von diesem durch die Flüssigkeit &c. wieder zum Kupfer nimmt, und ein negativer Strom, der vom Zink ausgehend die entgegengesetzte Richtung verfolgt. Der Kürze halber spricht man aber gewöhnlich nur von einem elektrischen Strome und versteht darunter den positiven Strom.

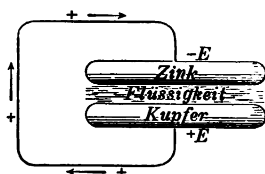


Fig. 94.

Die beiden unter den geschilderten Umständen gegen einander fließenden Ströme suchen das gestörte elektrische Gleichgewicht wiederherzustellen, was aber so lange nicht geschehen kann, als immer neue Mengen entgegengesetzter

Elektrizitäten in der Kombination sich ausscheiden. Die Intensität, mit welcher diese Ausscheidung angestrebt wird, nennt man die Stromstärke.

Die in Fig. 93 und 94 abgebildete elektromotorische Kombination wird als galvanische Kette oder galvanisches Element bezeichnet und zwar ist Fig. 93 ein offenes und Fig. 94 ein (durch den Stromkreis) geschlossenes Element. Die Endpunkte eines solchen Elementes heißen Pole, wobei derjenige Teil des zum Element gehörigen galvanischen Paares als positiv bezeichnet wird, der durch die Verbindung seines Poles mit einem Elektroskop positive Elektrizität anzeigt. Es wird angenommen, daß von dem so bestimmten positiven Pole des Elementes oder galvanischen Paares der elektrische Strom ausgeht und von da dem negativen Pole, d. h. demjenigen Teile des galvanischen Paares zuströmt, der am Elektroskop negative Elektrizität anzeigt. Die beiden Teile eines elektrischen Paares werden als Elektroden bezeichnet und zwar bezeichnet man (nach der oben angegebenen Art der Beurteilung) das eigentlich (nach seiner Stellung in der Spannungsreihe) elektrisch positive Zink als die positive Elektrode oder Anode, oder auch, weil dieses Metall sich im Betriebe des Elementes allmählich auflöst, als die lösliche Elektrode, während das eigentlich (der Stellung in der Spannungsreihe nach) elektrisch negative Metall (bezw. Kohle) als die negative Elektrode, Ableitungselektrode oder Kathode bezeichnet wird.

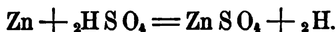
114. Die Polarisation und die lokalen Wirkungen. — Indem in einem galvanischen Elemente durch die positive Zinkelektrode (Anode) Wasser zersetzt wird, scheidet der Sauerstoff (O) sich am Zink, der Wasserstoff (H) sich am Kupfer, das ist an der negativen Elektrode (Kathode), aus. Der freigewordene Wasserstoff wird zumteil von dem Sauerstoff der Luft (insoweit diese sich in der Flüssigkeit, das ist in dem Elektrolyt befindet oder in den Elektrolyt eintreten kann) oxydiert, das ist wieder in Wasser umgewandelt, zumteil aber setzt sich auch der Wasserstoff an der

negativen Elektrode (Kathode) ab und vermindert mehr oder minder deren Wirkungsfähigkeit, wodurch die Stromabgabe des Elementes entsprechend geschwächt wird. Man bezeichnet diese durch den sich an der Kathode absetzenden Wasserstoff herbeigeführte Schwächung der elektromotorischen Kraft und folglich auch der Stromabgabe eines Elementes als Polarisation. Außerdem kann die Wirkung eines Elementes auch noch durch die infolge der darin stattfindenden chemischen Prozesse herbeigeführte Veränderung der Flüssigkeit und andere Ursachen geschwächt werden. Elemente, bei denen sich infolge der Schwächung der elektromotorischen Kraft im Betriebe sehr rasch eine Verminderung der Stromabgabe einstellt, bezeichnet man als unkonstante Elemente, während man dagegen konstante Elemente solche Elemente nennt, bei denen die Schwächung der elektromotorischen Kraft infolge der Polarisation auch während einer längeren Betriebszeit sich nur wenig oder vielleicht auch gar nicht bemerklich macht. Die Polarisation macht sich um so mehr geltend, je mehr man durch Verstärkung des Elektrolyts mittels Säurezusatz das Element zu übermäßiger Stromabgabe anregt.

Als Flüssigkeit, das ist als Elektrolyt wird im gewöhnlichen Voltaschen Zink-Kupferelement Wasser mit Schwefelsäurezusatz, das ist Schwefelsäurehydrat verwendet. Taucht man chemisch reines Zink in eine solche Flüssigkeit, so wird dasselbe an und für sich gar nicht angegriffen und es stellt sich somit keinerlei Wirkung ein. Erst wenn man neben dem an und für sich elektropositiven Zink ein anderes, nach der Spannungsreihe zum Zink elektronegatives Metall daneben eintaucht und beide Metalle durch einen Draht, als Schließungskreis, verbindet, tritt die den elektrischen Strom erzeugende chemische Wirkung auf.

Bezeichnet man, gemäß der üblichen chemischen Formulierung, das Zink mit Zn, das Schwefelsäurehydrat, das dem Atomgewicht nach aus 2 Gewichtsteilen Wasserstoff (H), 1 Gewichtsteil Schwefel (S) und 4 Gewichtsteilen Sauerstoff

$(_4O)$ besteht, mit $_2H\,S\,O_4$, so wird der bei der Auflösung des Zinks in der verdünnten Schwefelsäure stattfindende Prozeß durch die folgende chemische Gleichung ausgedrückt:



$$Zn + {}_2H\,S\,O_4 = Zn\,S\,O_4 + {}_2H.$$

Zink und Schwefelsäurehydrat geben schwefelsaures Zink und Wasserstoff.

Derselbe Prozeß tritt auch beim bloßen Eintauchen von gewöhnlichem käuflichen Zink schon ein, weil dieses Zink unrein, d. h.: mit anderen Metallen, insbesondere Eisen, Arsenik ꝛc., vermischt ist und infolgedessen im Zink selbst schon zwischen dessen einzelnen verschiedenartigen Teilchen elektrische Paare oder Ketten sich bilden, die zu sogenannten lokalen Wirkungen, d. h. stellenweis erzeugten elektromotorischen Kräften und demgemäß auch elektrischen Strömen Anlaß geben.

Um in den galvanischen Elementen dieser Wirkung vorzubeugen und also zu verhüten, daß das Zink auch nach Unterbrechung des Schließungskreises und des damit bezweckten Ruhezustandes des Elementes von der Säure angegriffen wird, pflegt man das Zink zu amalgamieren, d. h. oberflächlich mit Quecksilber zu überziehen, welches mit dem Zink sich verbindet und einen breiartigen Überzug von Amalgam bildet. Zu dem Zweck bereitet man ein Gemisch aus Sand, etwas Quecksilber und verdünnter Schwefelsäure und reibt damit das Zink mittels eines Wergballens ein. Die etwa im Zink vorhandenen, besonders die Lokalwirkungen hervorrufenden Eisenteilchen werden hierbei vom Amalgam abgesondert, indem sie sich nicht mit dem Quecksilber verbinden und diese freien Eisenteilchen lösen sich alsdann in der Säure vom Zink ab. Aus dem Amalgamüberzug wird nur das Zink von der Säure nach dem oben formulierten Prozeß aufgelöst, während das Quecksilber sich immer von neuem mit dem noch vorhandenen Zink zu Amalgam verbindet und somit der Säure stets eine reine Zinkoberfläche darbietet.

Neuerdings pflegt man das geschmolzene Zink, bevor man dasselbe zum Zweck der Herstellung von Elektroden in Platten, Stäbe oder sonst geeignet erscheinende Formen gießt, mit etwa 4 Gewichtsprozenten Quecksilber zu vermischen, wodurch das Zink noch besser vor dem unnützen Angriff der Säure geschützt wird.

Die oben erwähnte Polarisation sucht man ebenfalls in geeigneter Weise zu beseitigen, indem man dagegen entweder mechanische Mittel oder chemische Mittel oder auch ein elektrochemisches Mittel in Anwendung bringt.

Die bezüglichen mechanischen Mittel bestehen darin, daß man die elektrolytische Flüssigkeit durch Umrühren oder Zuführung von Luft, die in Blasen in der Flüssigkeit emporsteigen muß, in Bewegung setzt. Auch versieht man wohl die Oberfläche der positiven Elektrode (Kathode) mit einer gewissen Rauhigkeit, weil alsdann die Wasserstoffbläschen leichter davon entweichen, wie dies z. B. bei den Kohlenelektroden der Fall ist; immerhin ist aber die dadurch etwa herbeigeführte Beseitigung der Polarisation nicht sehr bedeutend. Bequemer und auch wirksamer sind in dieser Beziehung die chemischen Mittel. Zu dem Zweck versetzt man mit dem Elektrolyt eine z. B. sauerstoffreiche Substanz von starker Oxydationsfähigkeit, wodurch die Wasserstoffbläschen sofort bei ihrem Entstehen wieder zu Wasser oxydiert werden. Solche Substanzen sind: doppeltchromsaures Kali, Salpetersäure ꝛc. Da diese Substanzen das Kupfer angreifen würden, so ersetzt man dasselbe bei Anwendung derselben durch Kohle oder Platin und das Zink schützt man vor dem Angriff der Salpetersäure dadurch, daß man dasselbe mit einem besonderen aber großen Gefäß umgiebt, welches mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist.

Das elektrochemische Mittel gegen Polarisation besteht in einer derartigen Einrichtung des galvanischen Elementes, daß anstatt des Wasserstoffes ein Metall, z. B. Kupfer, ausgeschieden wird.

115. Die Grundgesetze der chemischen Wirkung bei den galvanischen Elementen. — In dieser Beziehung sind die beiden folgenden Grundgesetze chemischer Wirkung anzuführen:

1. Die chemische Wirkung eines Elementes ist dem durch das Element hindurchgehenden, beziehungsweise vom Element erzeugten elektrischen Strome und folglich auch der diesem Strome entsprechenden sogenannten Elektrizitätsmenge proportional.

Eine Elektrizitätsmenge von 1 Coulomb (S. 140) macht bei ihrem Durchgange durch das Element 0.000010352 g Wasserstoffgas frei und löst 0.00033644 g Zink in der Schwefelsäure auf.

2. Die chemische Wirkung ist in jedem Element einer aus einer Reihe von Elementen bestehenden Batterie gleichgroß.

116. Die Bedingungen, welche ein gutes galvanisches Element zu erfüllen hat. — Es sind in dieser Beziehung folgende Bedingungen zu erfüllen:

1. Die elektromotorische Kraft muß möglichst groß und möglichst konstant sein;

2. der innere Widerstand muß möglichst gering sein;

3. der Strom muß möglichst konstant sein, was durch möglichste Beseitigung der Polarisation herbeizuführen, wobei jedoch die Abnutzung des Elementes und die Bedienung des Elementes (insbesondere die Erneuerung der Säure) eine möglichst beschränkte sein muß;

4. die Kosten der Anschaffung und Unterhaltung müssen möglichst geringe sein;

5. das Element muß im Gebrauch bequem sein und darf nicht schädliche Dämpfe entweichen lassen.

Mit Bezug hierauf ist jedoch zu bemerken, daß keine galvanische Batterie vorhanden und wohl auch nicht herzustellen ist, die allen diesen Bedingungen in befriedigender Weise entspricht, weshalb man unter den verschiedenen Elementen immer das, welches für den vorliegenden Zweck am geeignetsten erscheint, zu wählen hat. Die elektromotorische Kraft einer Batterie ist von dem Material der Elemente,

sowie von der Anzahl der verbundenen Elemente abhängig. Der innere Widerstand der Elemente läßt sich dadurch vermindern, daß man möglichst große Platten dazu nimmt und diese möglichst nahe gegeneinanderstellt, so daß die Dicke der dazwischen befindlichen Flüssigkeitsschicht entsprechend gering ist; ferner ist zur Erfüllung derselben Bedingung eine möglichst gut leitende Flüssigkeit zu wählen.

Vierundzwanzigstes Kapitel.

Die Schaltung der galvanischen Elemente.

117. Parallelschaltung. — Verbindet man eine beliebige Anzahl von n ganz gleichartigen Elementen auf die in Fig. 93 illustrierte Weise mit ihren gleichnamigen Polen durch zwei parallele Leitungsdrähte, so nennt man diese Verbindung die P a r a l l e l s c h a l t u n g oder N e b e n e i n a n d e r s c h a l t u n g der Elemente und man erhält dadurch gewissermaßen ein Element von der nfachen Plattenoberfläche. Die elektromotorische Kraft E bleibt hierbei unverändert und der innere Widerstand vermindert sich auf $\frac{1}{n}$ r. Ist I die Stromstärke der Batterie und R der Widerstand des äußeren Stromkreises, so gilt die Gleichung:

$$I = \frac{E}{R + \frac{1}{n} r} = \frac{nE}{nR + r}.$$

Ist r im Verhältnis zu nR sehr groß, so kann man angenähert setzen:

$$I = \frac{nE}{r} = \frac{nE}{\text{Gesamtwiderstand}},$$

so daß also die Stromstärke der parallel geschalteten Batterie ungefähr um die Anzahl der Elemente größer ist, als die Stromstärke des einzelnen Elementes. Man sagt deshalb, eine derartig verbundene Batterie sei auf Quantität geschaltet.

118. **Reihenschaltung.** — Werden n gleichartige Elemente wie in Fig. 95 abwechselnd mit ihren entgegengesetzten Polen zu einer Reihe verbunden, so erhält man die Reihenschaltung (Serienschaltung) oder Hintereinanderschaltung. Hierbei addieren sich die elektromotorischen Kräfte E der n Elemente zur elektromotorischen Gesamtkraft nE, aber ebenso addieren sich auch die inneren Widerstände r zum inneren Gesamtwiderstand nr, so daß also für die Stromstärke die Gleichung gilt:

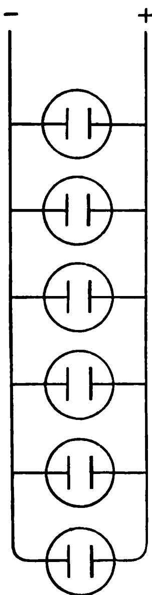


Fig. 95.

$$I = \frac{nE}{R + nr}.$$

Ist auch in diesem Falle der Widerstand im äußeren Stromkreise gegen den inneren Widerstand sehr klein, so hat man angenähert

$$I = \frac{nE}{nr} = \frac{E}{r} = \frac{E}{\text{Gesamtwiderstand}}.$$

Es ist also in diesem Falle die Stromstärke der ganzen (hintereinandergeschalteten) Batterie nicht größer, als die Stromstärke des einzelnen Elementes. Man sagt deshalb, die Batterie sei auf Spannung geschaltet.

119. **Die Gruppenschaltung.** — Verbindet man n Elemente gruppenweise zu parallel geschalteten gleichen Reihen, wie dies in den Parallelschaltungen von zwei oder drei Reihen

von zusammen sechs Elementen in Fig. 97 und 98 dargestellt ist, so gilt für die Berechnung der Stromstärke für x Reihen im allgemeinen die Gleichung:

$$I = \frac{\frac{n}{x} E}{R + \frac{n}{x} \frac{r}{a}} = \frac{x r E}{x^2 R + n r}.$$

Bei zwei Reihen zu je drei Elementen (Fig. 97 S. 242) ist:

$$I = \frac{6 E}{4 R + 6 r} = \frac{3 E}{2 R + 3 r}.$$

Bei drei Reihen zu je zwei Elementen (Fig. 98 S. 242) ist:

$$I = \frac{6 E}{9 R + 6 r} = \frac{2 E}{3 R + 2 r}.$$

Ist eine Batterie aus N einander genau gleichen Elementen zusammengesetzt, die in m parallelen Reihen von je n Elementen geschaltet sind; ist ferner e die elektromotorische Kraft und r der innere Widerstand jedes Elementes, dann ist die elektromotorische Kraft der Batterie $E = n e$ und deren innerer Widerstand $R_0 = \frac{n r}{q}$.

Wenn die Stromstärke der Batterie I ist, so ist die von der chemischen Wirkung in jeder Zeiteinheit gelieferte Arbeit

$$W = E I$$

und die äußere nutzbare Arbeit ist

$$U = E I - R I^2 = E I \left(1 + \frac{R_0 I}{E}\right) = R_0 I \left(\frac{E}{R_0} - I\right);$$

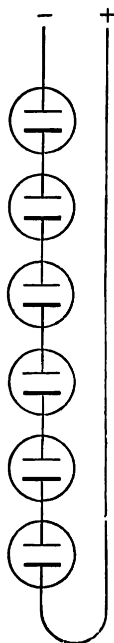
und der Nutzeffekt ist demnach:

$$U = \frac{U}{W} = 1 - \frac{R_0 I}{E}.$$

Bezeichnet man mit $I_0 = \frac{E}{R_0}$ diejenige Stromstärke, die vorhanden ist, wenn der Strom keine äußere Arbeit zu leisten hat, so gehen die Ausdrücke für U und u über in

$$U = R_0 I (I_0 - I)$$

$$u = 1 - \frac{I}{I_0} = \frac{I_0 - I}{I_0}.$$



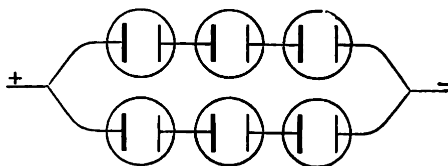


Fig. 97.

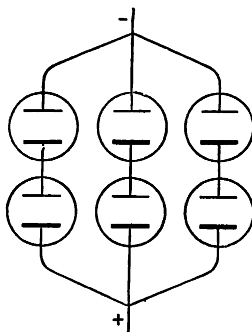


Fig. 96.

Fig. 98.

Die äußere Arbeit der Batterie wächst zunächst, wenn der Strom von seinem größten Werte I_0 bis Null abnimmt, um alsdann wieder abzunehmen. Der Nutzeffekt dagegen

wächst unter denselben Umständen immer fort und nähert sich der Einheit, wenn die Nutzbarkeit sich der Grenze Null nähert.

Da die Summe der beiden Faktoren I und (I_0 — I) konstant ist, so erreicht die äußere Arbeit ihren größten Wert U_m, wenn $I_0 = 2I$ ist. Der Nutzeffekt ist dann 0.50 und es ist

$$U_m = \frac{R_0 I_0^2}{4} = \frac{E^2}{4 R_0} = nq \frac{e^2}{4r} = N \frac{e^2}{4r}.$$

Das Maximum der in der Sekunde nutzbaren Arbeit ist demnach der Anzahl der Elemente proportional, gleichviel wie diese in der Batterie mit einander verbunden sind, und die größte Arbeit jedes einzelnen Elementes, oder seine mechanische Potenz, hat den Wert $\frac{e^2}{4r}$. Dieser Wert ist für jede besondere Type galvanischer Elemente charakteristisch. Wie schon erwähnt wurde, ist die Größe der elektromotorischen Kraft e eines Elementes von der Natur der wirksamen Materialien (Elektroden und Elektrolyte) abhängig, aus denen das Element zusammengesetzt ist, während der innere Widerstand r von der Form und den Dimensionen dieser Materialien bedingt wird.

Bei den gebräuchlichen Elementen erreicht die elektromotorische Kraft e selten die Größe von 2 Volts, dagegen ist der innere Widerstand r innerhalb weiter Grenzen verschieden. Die Bunsenschen Elemente haben die geringsten Widerstände, weshalb man dieselben in solchen Fällen benutzt, wo die Batterie eine beträchtliche Arbeit abgeben soll. Bezeichnet man die mechanische Potenz oder Arbeitsstärke, welche der Einheit der elektrischen Sekundenarbeit entspricht, als Watt, so ist

$$1 \text{ Watt} = \frac{1}{9.81} \times \frac{1}{75} = \frac{1}{736} \text{ Pferdestärke.}$$

Ein Bunsen-Element z. B., für das die elektromotorische Kraft $e = 1.8$ Volt und der innere Widerstand $r = 0.01$ Ohm ist, besitzt hiernach eine mechanische Potenz oder Arbeitsstärke von 81 Watt oder $\frac{1}{9}$ Pferdestärke.

Fünfundzwanzigstes Kapitel.

Hauptarten der galvanischen Elemente.

Man teilt die galvanischen Elemente in zwei Hauptklassen: in Primär- und in Sekundär-Elemente oder -Batterien. Die ersteren sind die eigentlichen Stromerzeuger. Die zweiten müssen erst mit einem elektrischen Strome geladen werden, um wirkungsfähig zu sein. Bei den Primärelementen unterscheidet man: Trockenelemente, Elemente mit einer Flüssigkeit und Elemente mit zwei Flüssigkeiten.

120. Die Trockenelemente. — A. Die Trockenelemente, die erst neuerdings ausgebildet worden sind, zeichnen sich durch bequeme Handhabung und Transportfähigkeit aus. Bei denselben ist die Flüssigkeit durch eine mit der Lösung eines Elektrolyts getränkte mehr oder minder feste oder gallertartige hygroskopische Masse ersetzt, zu deren Herstellung Kalkhydrat, Kreide, Thon oder Silikat verwendet wird.

Es sind insbesondere die folgenden Typen von Trockenelementen zu nennen:

1. Element von Hallesen (G. Wehr in Berlin). Das Element befindet sich in einem Kasten von 8 cm × 8 cm Länge und Breite und 16 cm Höhe. Der Zwischenraum von Boden und Deckel ist mit einer hygroskopischen Masse gefüllt, durch welche die aus dem Elemente aufsteigenden feuchten Gase getrocknet werden, um die Metallkontakte zu schützen. Dasselbe ist als eines der vorzüglichsten Trocken-

elemente anerkannt. Seine elektromotorische Kraft beträgt 1.4 Volt und sein innerer Widerstand schwankt zwischen 0.160 und 0.065 Ohm; im Mittel ist 0.12 Ohm anzunehmen.

2. Element von Bender. Form cylindrisch von 8 cm Durchmesser und 17.5 cm Höhe. Der äußere Behälter besteht aus Zink und bildet zugleich die Anode. Die Erregungsmasse besteht aus Chlorammonium mit Kreide und Chlorcalcium. Die Kathode wird durch einen hohlen Kohlencylinder (aus Retortenkohle) gebildet, der mit klarer Holzkohle zum Aufsaugen des Ammoniakgases und zur Verhütung der Polarisation versehen ist.

3. Element Gaßner. Ähnlich dem Element Bender.

4. Regenerativ-Trockenelement von Wolfschmidt und Brahm. Behälter kastenförmig: 7 cm × 6 cm Länge und Breite und 11 cm Höhe. Füllung bestehend aus äquivalenten Mengen Kalium, bezw. Natriumsilikat (Wasserglas) und dem entsprechenden übermangansauren Salz mit Kalkhydrat, bezw. Magnesiumoxyd oder Zinkoxyd mit Pfeifenthon zu einem steifen Brei gemischt. Die äußere, unlösliche Elektrode (Kathode) ist, zur Vergrößerung der Oberfläche, aus einem mit einer Zwischenwand versehenen Behälter gebildet, während die Zinkelektrode (Anode) aus einem Uförmig gebogenen Blech besteht, das in die beiden äußeren Abteilungen des äußeren Kastens hineinreicht. Die Regenerierung, sowie das Ersetzen von Flüssigkeit geschieht durch die im Verschlußdeckel des Elementes befindliche Glasröhre, die den Luftzutritt ermöglicht und zugleich zur Abführung der beim Gebrauch sich entwickelnden Gase dient. Außerdem wird diese Glasröhre noch mit hygroskopischen Salzen, wie Chlorcalcium, gefüllt, die aus der durchgehenden Luft die Feuchtigkeit aufsaugen und dieselbe an die elektrolytische Füllmasse des Elementes abgeben, um deren Austrocknen zu verhüten. Die elektromotorische Kraft dieses Elementes soll 1.4 bis 1.48 Volt betragen.

121. Elemente mit Flüssigkeit. — Man teilt dieselben in Elemente mit einer Flüssigkeit und solche mit zwei

Flüssigkeiten, oder auch in Zink-Kupfer- und in Zink-Kohlen-Elemente. Jedoch giebt es davon wieder Unterarten und Abarten.

B. Als wichtigste Primärelemente mit einer Flüssigkeit sind zu nennen:

Das Daniellsche Zink-Kupfer-Element, als ältestes Element dieser Art und jetzt in vielerlei Anordnungen gebräuchlich. Dasselbe hat sich noch einen besonderen Ruf als Normal-Element erworben, indem man die Einrichtung so treffen kann, daß in bequemer Weise eine sehr konstante elektromotorische Kraft erhalten wird.

Bei einigen Typen dieses Elementes sind die beiden Elektroden durch eine poröse Zelle geschieden und die Zinkelektrode ist von verdünnter Schwefelsäure oder von Kochsalzlösung 2c. umgeben, während die Kupferelektrode sich in einer Lösung von Kupfervitriol (Kupfersulfat) befindet; bei anderen Typen sind die mit ihren Flächen horizontalen Elektroden so angeordnet, daß die Kupferplatte mit der spezifisch schwereren Kupferlösung sich zu unterst, die Zinkplatte in der spezifisch leichteren Schwefelsäurelösung sich zu oberst befindet. Man vermeidet in diesen sogenannten Gravity-(Schwerkrafts-)Elementen die poröse Zelle deshalb, weil sich dieselbe mit der Zeit durch die in den Poren sich einnistenden Krystalle, sowie durch sich absetzenden Schlamm verstopft und mit ausgeschiedenem Kupfer bedeckt, wodurch eine leitende Verbindung zwischen den beiden Elektroden



Fig. 99.

entstehen kann, indem durch die sogenannte Metallvegetation das Zink mit Kupfer bedeckt und das Element unbrauchbar wird. Im Ruhezustande des Elements tritt diese Erscheinung früher ein, als wenn das Element sich im dauernden Betriebe befindet; auch ist im Ruhezustande die Abnutzung des Zinks ziemlich groß.

Eine gebräuchliche ältere Anordnung des Elements zeigt Fig. 99. Der Zinkcylinder mit der verdünnten Schwefelsäure befindet sich innerhalb der porösen Thonzelle, die vom Kupfercylinder umgeben ist. An diesem Kupfercylinder ist ein aus Kupferblech gebildeter, siebartig durchlöcherter Behälter oberhalb angelötet, worin sich Kupfervitriolkrystalle befinden, die sich in der das Kupfer umgebenden Kupfersulfatlösung im Verhältnis zur Abscheidung des Kupfers aus derselben allmählich auflösen und so die Lösung konzentriert erhalten. Die bei dieser Anordnung verhältnismäßig große Kupferfläche trägt zur Konstanterhaltung der elektromotorischen Kraft bei, indem dadurch die Polarisation der Kathode weniger bemerkbar wird.

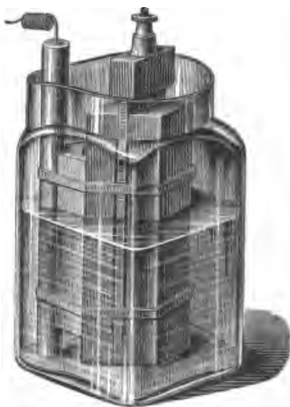


Fig. 100.

Das Leclanché-Element oder Zink-Kohlen-Braunstein-Element (Fig. 100) übertrifft das Daniell-Element bedeutend an Leistungsfähigkeit und Konstanz. Die flache, plattenförmige Kohlenelektrode ist beiderseits mit einer dicken Platte bedeckt, die aus einem Gemisch von Kohlenpulver, Braunsteinpulver und Schellack unter Erwärmung und Druck hergestellt ist. Die stangenförmig cylindrische Zinkelektrode ist durch eine Zwischenlage aus

Kautschuk von der Kohlenelektrode isoliert. Durch Gummibänder werden in dieser Weise beide in eine Salmiaklösung eingesetzten Elektroden zusammengehalten.

C. Die Elemente mit zwei Flüssigkeiten. Bei diesen Elementen sind die beiden Elektroden von getrennten, verschiedenartigen elektrolytischen Flüssigkeiten umgeben. Die Trennung der beiden Flüssigkeiten erfolgt entweder einfach durch deren verschiedenes spezifisches Gewicht, oder mittels einer porösen Scheidewand, bezw. eines porösen Gefäßes, der sogenannten Thonzelle. Es sind hier als besonders bemerkenswert die folgenden Elemente zu erwähnen.

Das Meidingersche Zink-Kupfer-Element (Fig. 101) hat keine poröse Zelle; es besteht aus einem Glasgefäß A von 20 cm Höhe und 12.5 cm Weite, auf dessen Boden ein kleines Glasgefäß d steht, welches etwa halb so weit wie das große Gefäß ist. Dieses kleinere Gefäß ist mit Schellack auf den Boden des größeren Gefäßes festgekittet. In den oberen Teil des großen Glases bis etwa ein Drittel der Höhe vom Boden entfernt befindet sich ein Cylinder Z aus 3 mm starkem Zinkguß, welcher unten auf einem Ansatze des Gefäßes aufsteht. An die innere Wand des kleinen Gefäßes legt sich ein Cylinder e aus Kupferblech an, der mit einem durch ein Glasrohr isolierten Drahte g versehen ist. Die Mündung des größern Gefäßes ist durch einen Deckel aus Holz oder Ebonit (Hartgummi) geschlossen, der in der Mitte eine Öffnung zur Aufnahme des Halses eines am Boden gelochten langcylindrischen Glases h von

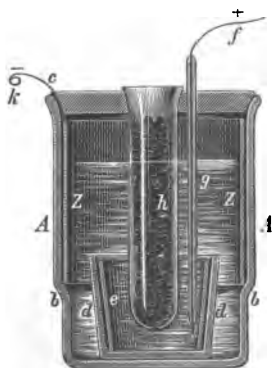


Fig. 101.

20 cm Höhe und 3.8 cm Durchmesser hat. Dieses enge Glas reicht fast bis auf den Boden des kleinen inneren Gefäßes d hinab. Das große Gefäß ist mit einer verdünnten Lösung von schwefelsaurer Magnesia (Bittersalz) (auf 1 Teil Salz 4 bis 5 Teile Wasser) gefüllt; im Glasrohre h befinden sich Krystalle von Kupfervitriol, welche eine konzentrierte Lösung bilden, die vom kleinen Gefäße d aufgenommen wird. Dieses Element zeichnet sich durch sehr konstante Wirkung aus; sein Leitungswiderstand ist sehr bedeutend.

Meidingers Ballonelement (Fig. 102) ist als eine Modifikation des vorhergehenden anzusehen. Dasselbe besteht aus einem gleichweiten cylindrischen Glase, auf dessen Boden ein konischer Glasbecher mit breitem, tellerförmigem Fuße ruht, so daß er sicher in der Mitte steht. An die innere Wand dieses Bechers schmiegt sich ein Ring aus Kupfer oder Blei an, der als negative Elektrode dient und mit einem angelöteten Kupferdraht oder Bleistreifen versehen ist. Innerhalb des äußern Glasgefäßes befindet sich ein großer weiter Zinkcylinder, an welchem in der ganzen Länge der nach außen gehende kupferne Ableitungsstreifen oder -Draht angelötet ist. Oben ist ein umgestürzter Glasballon aufgesetzt, der mit Kupfervitriolkrystallen gefüllt und dessen Mündung durch einen Korkpfropfen verschlossen ist, durch welchen ein Glasröhrchen hindurchgeht. Das äußere Gefäß ist mit einer Lösung von Bittersalz (schwefelsaurer Magnesia) gefüllt.

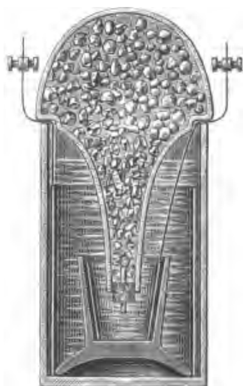


Fig. 102.

Die Bleielektrode bietet den Vorteil der Billigkeit; dieselbe überzieht sich bald mit Kupfer, welches zeitweis durch Biegen des Bleies sich leicht entfernen läßt. Der aus Blei

hergestellte Ableitungsstreifen braucht nicht isoliert zu werden. Durch die stets gesättigt erhaltenen Lösungen wird ein starker Verbrauch an Kupfervitriol und Zink herbeigeführt, jedoch auch das Element sehr konstant erhalten. Das Glasröhrchen soll nur so viel Kupfervitriollösung aus dem Ballon heraustreten lassen, als für den Verbrauch nötig ist, weil dieselbe sonst übersteigt und das Zink verkupfert wird. Besser ist es daher, den Zinkcylinder nicht bis zum Boden hinabgehen zu lassen, wie dies bei dem vorhergehenden Elemente der Fall ist.

Siemens-Halskes Zink-Kupferelement (Fig. 103) unterscheidet sich vom Daniell-Element durch die Form der Elektroden und die Herstellung der Scheidewand zwischen den Flüssigkeiten. A ist das Glasgefäß; c ein Glasrohr; k ein spiralförmig gebogenes senkrecht stehendes Kupferblech, woran ein Draht b angelötet ist; e ist eine Pappscheibe; f eine dicke Scheibe aus einer eigentümlich zubereiteten pergamentartigen Papiermasse, welche die Stelle der porösen Zelle ersetzt, indem sie eine Scheidewand zwischen den Flüssigkeiten bildet; g ist eine lockere Gewebeschicht.

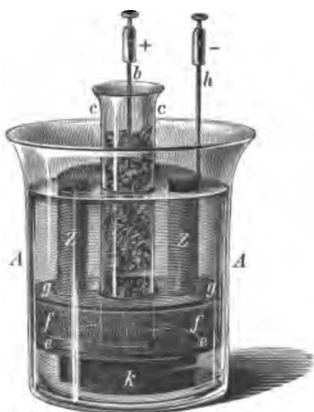


Fig. 103.

Z ist das cylindrisch gebogene nicht amalgamierte Zinkblech, woran ein Kupferdraht h mit Schraubenklemme angelötet ist. Der innere Glascylinder c ist mit Krystallen von schwefelsaurem Kupfer gefüllt und Wasser darüber gegossen. Der Raum um c enthält angesäuertes Wasser oder eine Kochsalz-

lösung. Bei dem Betriebe der Batterie ist es nur nötig, den innern Cylinder mit Kupfervitriolkrystallen gefüllt zu erhalten und das Wasser im äußern Gefäße von Zeit zu Zeit zu erneuern. Die pergamentartige Papiermasse ist mit einer Scheibe aus grobem Tuche bedeckt, welche bei der etwa alle acht Tage vorzunehmenden Reinigung des Elementes erneuert werden muß. Diese Elemente sind sehr konstant, ihre elektromotorische Kraft ist = 0.9 Daniell.

Das Grove-Element (Fig. 104 und 105) besteht aus einem Glasgefäß A, das etwa zu dreiviertel mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist und einen amalgamierten Zinkcylinder Z enthält, der eine Schraubenklemme a trägt.

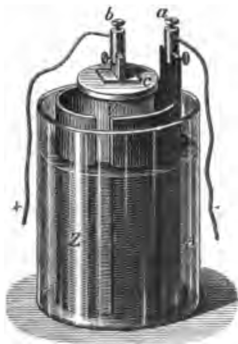


Fig. 104.

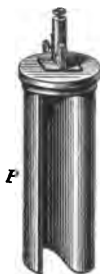


Fig. 105.

Im Zinkcylinder steht die poröse Thonzelle V, welche die Salpetersäure und die aus ∽förmig gebogenem Platinblech bestehende negative Elektrode P (Fig. 105) enthält, welche mit dem Ebonitdeckel c und der Schraubenklemme b fest verbunden ist. Das äußere Gefäß hat 12 bis 13 cm Durchmesser und 17 bis 18 cm Höhe.

Das Bunsen-Element unterscheidet sich in seinen Bestandteilen nur dadurch vom Grove-Element, daß die

Platinelektrode durch einen die poröse Zelle umschließenden Kohlencylinder ersetzt und die Zinkelektrode in der porösen Zelle enthalten ist, in welcher sich demnach auch die verdünnte Schwefelsäure befindet, während das äußere Gefäß die Salpetersäure enthält. Es wird durch diese Anordnung eine große Oberfläche und dadurch eine verstärkte Depolarisierung des Elementes erreicht. Der bei diesen Elementen aus der Salpetersäure sich entwickelnde schädliche Dampf soll dadurch verhütet werden, daß man die Salpetersäure über Krystalle von doppeltchromsaurem Kali filtriert.

Siemens-Halskes modifiziertes Bunsen-Element (Fig. 106) besteht aus einem durchlöcherten Kohlencylinder c von 11.5 cm Höhe, 5.3 cm innerem und 7.6 cm äußerem Durchmesser; die poröse Zelle c ist ebenfalls 11.5 cm hoch und hat 5 cm äußeren Durchmesser. Die Zinkelektrode d hat einen kreuzförmigen Querschnitt, und der Draht s, welcher in dieselbe eingelötet ist, dient mittels der Schraubenklemme f zur Verbindung mit der Kohlenelektrode des nächsten Elementes. Um den oberen Teil des Kohlencylinders ist ein Bleistreifen gelegt und darüber ein breiter Kupferring mittels einer Schraube festgespannt. Das äußere Gefäß enthält die Salpetersäure, das innere (die Thonzelle) die verdünnte Schwefelsäure.



Fig. 106.

Die Zink-Kohlen-Chromsäure-Elemente bieten gegenüber den Salpetersäure-Elementen den Vorteil, daß

trotz der Benutzung einer starken Säure doch die Bildung schädlicher Dämpfe vermieden ist. Die zu dem Zweck benutzte Chromsäurelösung wird dadurch hergestellt, daß 12 Gewichtsteile doppeltchromsaures Kali in 100 Teilen Wasser gelöst und durch allmähliches Zugießen von 25 Teilen konzentrierter Schwefelsäure zersetzt werden, wobei sich Kaliumsulfat bildet und die schön rote Chromsäure frei wird. Die Chromsäure-Elemente geben nur kurze Zeit einen starken, ziemlich konstanten Strom, dann nimmt aber deren elektromotorische Kraft infolge der Reduktion der Chromsäure zu grünem Chromoxyd rasch ab, so daß, wenn man das Element konstant erhalten will, die Chromsäure häufig ersetzt werden muß.

Die *Quellenbatterie* (Fig. 107—109) ist eine Form der Chromsäurebatterie, mit welcher eine konstante, kräftige

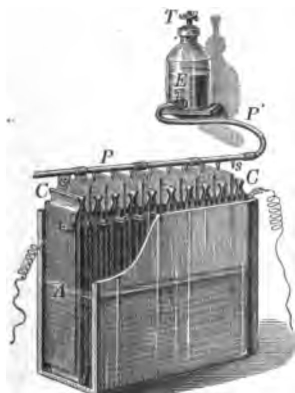


Fig. 107.



Fig. 108.

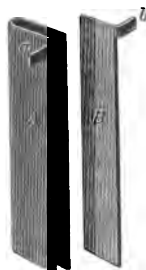


Fig. 109.

Wirkung, wie sie besonders für Beleuchtungszwecke nötig ist, erzielt werden kann. Fig. 107 zeigt in perspektivischer Ansicht die Einrichtung der *Grenetschen* Quellenbatterie.

Die negative Elektrode besteht aus einem im Querschnitt Uförmig gebogenen Kupferblech A (Fig. 109) von etwa 50 cm Länge und 25 cm Breite, das bei a mit einem Kupferstreifen versehen ist. B ist ein Zinkblechstreifen von etwa 40 cm Länge und 11.5 cm Breite. Dieser Zinkblechstreifen wird mit einem Flanellstreifen eingehüllt, wie Fig. 108 zeigt; dieser Flanellstreifen ist bei f und g zusammengenäht, so daß er unterhalb, bei f, die Berührung der Zinkplatte mit dem Gefäßboden verhindert und für die Zinkplatte ein straff anliegendes Futteral bildet. Bei dem Zusammensetzen der Batterie wird die Kupferplatte mit einem Brei aus Lampenruß und verdünnter Schwefelsäure dick bestrichen und die Zinkplatte in die vorher mit verdünnter Schwefelsäure getränkte Flanellhülle eingesteckt, worauf man dieselbe zwischen die gebogene Kupferplatte einschiebt, so daß die Flanellhülle oben und unten etwa 2 cm weit vorsteht. Hierbei muß das Kupfer dicht an dem Flanell anliegen, aber dasselbe darf das Zink nicht berühren. Die so zusammengefügten Elemente werden in einen Kasten aus gefirnißtem Holz, Glas, Steingut oder Hartgummi und dergl. gestellt, wobei zwischen je zwei Elemente ein Blatt starkes paraffiniertes Papier eingefügt wird. Die Elemente werden alsdann an den Streifen a und b in der Reihe verbunden, das ist auf Spannung geschaltet. Über der Batterie befindet sich ein horizontales Rohr P aus Glas oder Porzellan, das mit kleinen Mundstücken S versehen ist, so daß sich über jedem Papierblatt ein solches Mundstück befindet. Das Rohr P ist durch einen Kautschukschlauch P′ mit einer hochstehenden großen Flasche E verbunden, die mit einer schwefelsauren Lösung von doppeltchromsaurem Kali (1.5 kg doppeltchromsaures Kali, 2 kg Schwefelsäure auf 1 l Wasser) gefüllt ist. Der Abfluß der Flüssigkeit wird mittels eines Hahnes T durch den Luftzufluß so reguliert, daß die Flüssigkeit tropfenweis aus den Mundstücken S auf die Papierblätter rinnt und diese feucht erhält. Diese Batterie entwickelt eine bedeutende Stromstärke und wirkt

bei gehöriger Regelung des Flüssigkeitszuflusses angenähert konstant. Man hat dergleichen Batterien auch schon zur Erzeugung von elektrischem Licht benutzt, jedoch ist der Betrieb ein zu kostspieliger.

Hieran schließen sich die mit einer Flüssigkeit versehenen Taucherbatterien, die mit Hebel- oder Kurbelvorrichtung zum Ausheben der Elektroden versehen sind. Die Kohlen- und Zinkplatten sind meist 180 × 80 mm groß und die Lösung besteht aus einer Auflösung von doppeltchromsaurem Kali oder Natron in verdünnter Schwefelsäure. Ferner wird aber auch empfohlen, eine Lösung aus 10 Gewichtsteilen doppeltchromsaurem Kali und 1 Teil schwefelsaurem Quecksilberoxyd in 18 Teilen chemisch reiner Schwefelsäure mit 100 Teilen Wasser anzuwenden.

122. **Das Edison-Lalande-Element.** — Dieses neuerdings in Amerika aufgekommene Element zeichnet sich durch Billigkeit in der Anschaffung, durch geringe Betriebskosten und bequeme Benutzung aus; auch ist es nicht gesundheitsgefährlich durch Entwickelung schädlicher Gase; dabei ist aber seine Wirksamkeit eine sehr gute. Bei demselben dient Zink als positive und schwarzes Kupferoxyd als negative Elektrode. Die elektrolytische Flüssigkeit besteht aus einer 23prozentigen Lösung von Ätzkali in Wasser, d. h. 3 Gewichtsteile Wasser auf 1 Gewichtsteil Ätzkali. Wird der Stromkreis geschlossen, so wird Wasser zersetzt; der Sauerstoff bildet mit dem Zink Zinkoxyd, welches sich mit dem Kali zu einem sehr leicht löslichen Doppelsalz verbindet, das sich aber sofort wieder zersetzt. Der durch die Wasserzersetzung neben dem Sauerstoff frei werdende Wasserstoff reduziert das Kupferoxyd zu metallischem Kupfer, welches wieder in Kupferoxyd zu neuem Gebrauch umgewandelt werden kann.

123. **Das Normal-Element (Etalon-Element).** — Zur Bestimmung der elektromotorischen Kraft der Elemente wird das Daniell-Element in besonderer zweckmäßiger Konstruktion benutzt, indem die elektromotorische Kraft eines solchen Elementes nahezu dem Normalmaße (nach dem

C. G. S.-System) dieser Größe, das ist einem Volt, entspricht. In der That ist die elektromotorische Kraft des Daniell-Elementes = 1.097 Volt.

Das Daniell-Normal-Element besteht aus einer in einer porösen Thonzelle befindlichen Kupferelektrode und einem amalgamierten Zinkcylinder. Das Zink befindet sich in einer Flüssigkeit, die aus 1 Gewichtsteil Schwefelsäure und 4 Teilen Wasser besteht, während das Kupfer in gesättigte Kupfervitriollösung eingetaucht ist. Anstatt der Schwefelsäurelösung ist noch besser eine Zinkvitriollösung (1 Gewichtsteil Zinksulfat auf 2.5 bis 3 Teile Wasser) zu benutzen.

Das Warrensche Normal-Element (Fig. 110) von Warren de la Rue besteht aus einem Glasgefäß A, das

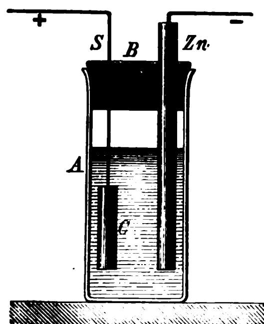


Fig. 110.

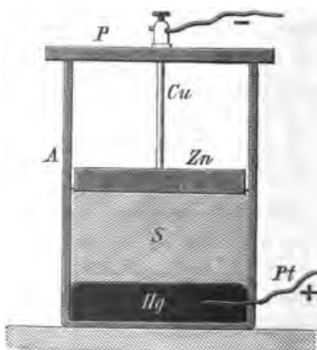


Fig. 111.

mittels eines Paraffinpfropfens B geschlossen ist. Durch diesen Pfropfen geht die cylindrische Zinkelektrode Zn (aus chemisch reinem Zink) und ferner der mit der negativen Elektrode C verbundene Draht S hindurch. Diese negative Elektrode besteht aus einem Cylinder aus Chlorsilber, der um den Silberdraht S gegossen ist. Als Flüssigkeit wird

eine Lösung von 23 Gewichtsteilen Chlorammonium (Salmiak) und 1000 Teilen Wasser benutzt. Die elektromotorische Kraft beträgt 1.068 Volt.

Das Clarksche Normal-Element (Fig. 111). Im Porzellan- oder Glasgefäß A befindet sich unterhalb reines Quecksilber Hg, darüber ein Brei aus schwefelsaurem Quecksilber und Zinkvitriol S, auf dem die scheibenförmige Zinkelektrode Zn liegt, die mit einer Kupferstange Cu verbunden ist; diese Kupferstange geht durch den das Gefäß A schließenden Ebonitdeckel P hindurch und ist mit der oberen Klemme verschraubt, die den negativen Pol bildet. Der positive Pol ist durch einen in das Gefäß eingelassenen Platindraht P′ gebildet, der in das Quecksilber hineinragt. Der erwähnte Brei S wird folgendermaßen hergestellt: Es wird reines Zinksulfat in kochendem Wasser bis zur Sättigung gelöst. Nach der Abkühlung gießt man die Flüssigkeit ab und vermischt dieselbe mit gepulvertem schwefelsauren Quecksilberoxydul, worauf man die Mischung kocht, so daß ein dicker Brei entsteht, der über das vorher erwärmte und so in das Gefäß gegossene Quecksilber gelegt wird. Die elektromotorische Kraft dieses Elementes beträgt 1.457 Volt.

124. Materialverbrauch der Elemente. — Bezeichnet man mit p das elektrochemische Äquivalent einer der Substanzen, die bei den chemischen Prozessen in den Elementen mitwirken, so entspricht p der Gewichtsmenge dieser Substanz, die einem von dem betreffenden Element gelieferten Ampère Stromstärke in der Sekunde oder einem Coulomb Elektrizitätsmenge äquivalent ist. Für einen Strom von der Stärke I ist die Gewichtsmenge des in Betracht gezogenen Körpers (insbesondere des Zinks), die in jedem einzelnen Element in der Zeiteinheit zur Wirkung kommt, gleich $p \frac{I}{q}$. Die betreffende Gewichtsmenge P, die von der ganzen Batterie von N Elementen in der Zeit t verbraucht wird, ist also

$$P = Np \frac{I}{q} t = np\,It,$$

und die dieser chemischen Wirkung entsprechende Energie ist, ausgedrückt in Meterkilogramm:

$$W = \frac{EIt}{9.81} = \frac{e}{9.81} \cdot \frac{P}{p}.$$

Selbstverständlich ist die verbrauchte Energie unabhängig von der Wirkungszeit t und von der Anordnung (Schaltungsweise) der Elemente; sie ist aber von der elektromotorischen Kraft jedes einzelnen Elementes und von der Anzahl der zur Wirkung kommenden Äquivalente $\frac{P}{p}$ abhängig.

Da die Arbeit einer Pferdestärke während einer Stunde, oder die sogenannte Pferdestunde $75 \times 3600 = 270000$ Meterkilogramm beträgt, so ist die Anzahl elektrochemischer Äquivalente, die einer Pferdestunde entspricht,

$$\frac{P}{p} = \frac{9.81}{e}\, 270000 = \frac{2.65}{e}\, 10^6,$$

was für Wasserstoff, dessen elektrochemisches Äquivalent (S. 87) 0.1035×10^{-4} ist, ein Gewicht von

$$\frac{2.65 \times 10.35}{e} = \frac{27.43}{e}\ g$$

ergiebt.

Aus diesem dem Wasserstoff entsprechenden Betrag kann man die entsprechenden Gewichte der verschiedenen, im Betriebe der galvanischen Batterien in Betracht kommenden Körper berechnen, sobald die in den Elementen stattfindenden chemischen Reaktionen bekannt sind; häufig sind jedoch diese Wirkungen von sehr zusammengesetzter Natur. Dies ist z. B. bei der Salpetersäure der Fall, die zur Depolarisierung im Bunsen-Elemente dient. Infolge des Durchganges eines Coulomb wird in diesem Falle ein Äquivalent, oder auch nur ein Drittel Äquivalent der Salpetersäure zersetzt, jenach-

dem dieselbe in Untersalpetersäure oder in salpetrige Säure reduziert wird. Durchschnittlich ist also die Hälfte eines Äquivalentes für die Zersetzung der Salpetersäure im Bunsen-Elemente anzunehmen.

Man findet so für die beiden am meisten benutzten Typen von Elementen die folgenden Verbrauchswerte:

Verbrauch für eine Pferdestunde.

Daniell-Element ($e = 1$ Volt)

Zink ($Zn = 65$)	0.905 kg
Schwefelsäure ($SO_3, H_2O = 98$)	1.344 „
Kupfervitriol ($Cu, SO_3 + 5 H_2O = 249.5$)	3.420 „

Bunsen-Element ($e = 1{,}8$ Volt)

Zink ($Zn = 65$)	0.503 „
Schwefelsäure ($SO_3, H_2O = 98$)	0.746 „
Salpetersäure ($N_2O_5, 4 H_2O = 90$)	0.685 „

Das sich bildende Zinkvitriol (Zinksulfat) ist in beiden Fällen als ein wertloses Produkt zu betrachten. Dagegen kann man das im Daniell-Element sich ausscheidende Kupfer wieder in Kupfervitriol (Kupfersulfat) umwandeln und diesen von neuem für den Betrieb der Batterie benutzen, so daß nur die Kosten für die Schwefelsäure hierbei in Betracht zu ziehen sind.

Man kann den Preis für ein Kilogramm von diesen verschiedenen Materialien wie folgt annehmen: für Zink 0.40 ℳ, für Salpetersäure 0.40 ℳ und für Schwefelsäure 0.08 ℳ. Wegen der Amalgamierung des Zinks, die zur Vermeidung des unnützen Zinkverbrauchs nötig ist, hat man den Preis für das Zink etwa auf das Doppelte, das ist auf 0.80 ℳ pro Kilogramm, zu erhöhen. Dann hat man:

Preis für eine Pferdestunde

beim Daniell-Element	1 ℳ
beim Bunsen-Element	0.73 ℳ

Betreffs der hier aufgestellten Zahlen ist jedoch zu beachten, daß stets nur ein Bruchteil der vorausgesetzten

Energie nach außen nutzbar zu machen ist, so daß man, selbst bei Erfüllung der Bedingungen für die Maximalarbeitsleistung, alle angegebenen Zahlenwerte noch zu verdoppeln hat.

125. **Das Verhalten der verschiedenen galvanischen Elemente hinsichtlich ihrer Leistung oder äußern Arbeit.** — Zur Vergleichung der wichtigsten Elemente hat Reynier die folgende Formel aufgestellt und danach eine Tabelle berechnet. Ist E die elektromotorische Kraft, W_1 der innere Widerstand und T die äußere maximale Arbeit in Meterkilogramm, so gilt die Gleichung:

$$T = \frac{E^2}{4\,W_1 \,.\, 9.81}.$$

Bezeichnung des Elementes	E	R	T
Bunsen cylindrisch 20 cm hoch . .	1.80 Volt	0.24 Ohm	0.344
Bunsen parallelipipedisch 20 cm hoch	1.80 „	0.06 „	1.378
Daniell 20 cm hoch	1.06 „	2.80 „	0.010
Carré 20 cm hoch	1.30 „	0.12 „	0.238
Reynier 20 cm hoch	1.56 „	0.075 „	0.619

Sechsundzwanzigstes Kapitel.

Die Sekundärelemente oder Akkumulatoren.

126. **Definition.** — Sekundärelemente, Akkumulatoren oder Sammler sind elektrolytische wirksame Apparate, die mittels starker Polarisation unter Mitwirkung von Oxydation an den Elektroden zur Aufspeicherung elektrischer Energie dienen, die alsdann als elektrischer Strom wieder frei gemacht und beliebig benutzt werden kann. So kann ein gewöhnliches Voltameter oder (zur Erhöhung der Spannung) eine Batterie hintereinandergeschalteter Voltameter als Akkumulator

benutzt werden, indem deren Elektroden mittels eines hindurchgeleiteten Stromes mit Wasserstoff, bezw. mit Sauerstoff beladen werden, worauf dieser geladene Akkumulator durch Verbindung seiner Pole mit einem Stromkreise einen elektrischen Strom in der umgekehrten Richtung des Ladestromes abgiebt. Ein derartiger, aus gewöhnlichen Voltametern gebildeter Akkumulator giebt jedoch keine Wirkung von genügender Stärke und Dauer. Eine solche Wirkung kann nur von besonders zu dem Zweck konstruierten Akkumulatoren erhalten werden. Am besten eignet sich das Blei zu den Elektroden eines Akkumulators und es wurde dasselbe zuerst von Gaston Planté (1860) dazu benutzt.

127. **Das Plantésche Sekundärelement.** — Das Plantésche Sekundärelement bestand in seiner ursprünglichen Form aus zwei dünnen, etwa 10 cm breiten und möglichst langen Bleistreifen, die mit einer Zwischenlage von grober Leinwand übereinandergerollt und in ein Gefäß mit Wasser, angesäuert mit Schwefelsäure, eingestellt waren. Zur Ladung des Apparats wurde jeder der beiden Bleistreifen mit dem Pole eines starken Elektrizitätserzeugers (Planté benutzte dazu eine starke, auf Spannung geschaltete Batterie) verbunden. Der durch die beiden Bleistreifen geleitete elektrische Strom zersetzte das Wasser. Hierdurch wurde bewirkt, daß der mit dem negativen Pol des Elektrizitätserzeugers verbundene Bleistreifen (die Kathode) sich mit Wasserstoffbläschen überzog, so daß seine Oberfläche vollständig sauerstofffrei und dadurch positiv elektrisch wurde, während der andere, mit dem positiven Pol verbundene Bleistreifen (die Anode) sich mit Bleisuperoxyd bedeckte und folglich, als negativ elektrisch, zur Aufnahme von Wasserstoff geneigt wurde. War so nach längerer Stromdurchleitung die Sekundärbatterie geladen worden, so war dieselbe fähig, im eignen Stromkreise einen entsprechenden Entladungsstrom in umgekehrter Richtung abzugeben, wobei die oxydierte Bleiplatte einen Teil ihres Sauerstoffs an die reine, positive Bleiplatte abgab, so daß

letztere sich oxydierte, bis beide Bleiplatten mit einer gleichartigen Oxydschicht bedeckt waren. Nach wiederholter Ladung in abwechselnden Richtungen überzieht sich die Bleiplatte der Anode mit einer stark porösen Schicht von braunem Bleisuperoxyd, während auf der Oberfläche der Kathode rein metallischer stark poröser Bleischwamm sich bildet, der eine große Oberfläche zur Aufnahme von Wasserstoff darbietet. Wird eine so vorbereitete, d. h. mit formierten Bleiplatten versehene Akkumulatorbatterie mittels einer Dynamomaschine geladen, so speichert sich an der Anode eine große Menge Sauerstoff auf, während die Kathode durch den frei werdenden Wasserstoff zu reinem Bleischwamm desoxydiert wird.

Das Plantésche Verfahren in der Herstellung der Akkumulatorplatten war sehr zeitraubend, indem der Formierungsprozeß, durch welchen die genügend poröse Herstellung der Plattenoberfläche bewirkt wurde, sechs bis acht Wochen in Anspruch nahm, wobei der elektrische Strom immerfort bald in der einen Richtung, bald in der anderen Richtung durch die Bleiplatten gesendet wurde.

128. **Das Fauresche Sekundärelement.** — Um die zeitraubende und daher auch kostspielige Herstellungsweise der Elektroden zu umgehen, wurde von Camille Faure im Jahre 1880 ein anderes Verfahren in Anwendung gebracht. Derselbe versah die Bleiplatten mit einem Überzug von Mennige, einer Verbindung von Bleioxyd ($Pb\,O$) und Bleisesquioxyd ($Pb_2\,O_3$). Das Verfahren war dabei das folgende: Die Streifen oder Platten wurden aus 1 bis 1.5 mm dickem Bleiblech in etwa 50 cm Länge und 20 cm Breite zugeschnitten und je mit 700 bis 800 g eines Breies aus Stärkekleister und Mennige bestrichen. Der Anstrich ward hierauf mit Pergamentpapier bedeckt und das Ganze in ein wollenes Gewebe eingehüllt, alsdann wurden die beiden Platten auf einander gelegt und so zusammengerollt, daß zwischen ihnen etwas Luft blieb, worauf man die Rolle in ein mit verdünnter Schwefelsäure gefülltes Gefäß steckte.

Fig. 112 stellt ein solches nach Faure angefertigtes Sekundärelement dar.


Fig. 112.

Fig. 113 bis 115 zeigen einige Formen von Sekundärelementen, welche später von Faure hergestellt wurden. Die Platten bestehen aus Blei und sind mit einer Schicht von Metallsalzen oder Metalloxyden vermischt mit Bleisulfat und pulverisierten Koks bekleidet. Wenn zwei so präparierte Elemente in verdünnte Schwefelsäure eingetaucht und mit einer Elektrizitätsquelle in Verbindung gesetzt werden, so werden die Salze auf der einen Platte reduziert und bilden eine fest anhaftende poröse Schicht. Wird alsdann der Strom umgekehrt, so wird die andere Platte ähnlich affiziert und die erste Platte wird oxydiert, so daß ein galvanisches

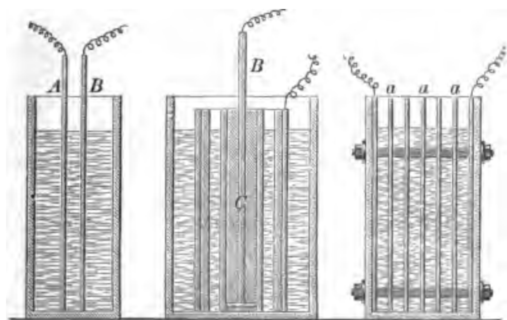


Fig. 113. Fig. 114. Fig. 115.

Paar gebildet wird. Fig. 113 ist eine Batterie mit zwei ebenen Platten A und B, Fig. 114 eine Batterie mit cylindrisch gebogenen Platten und Fig. 115 eine Batterie

mit flachen Platten, welche zu Zellen mit einander vereinigt sind. In Fig. 114 ist B eine zentrale Stange aus Blei oder Kohle, welche in den aus porösem Material bestehenden Cylinder C eingeschlossen ist; der ringförmige Raum zwischen C und dem Zentralelement wird zuerst mit Bleisulfat und Koks gefüllt. In Fig. 115 sind **aaa** Bleiplatten von etwa 1 qm Fläche, die durch Kautschukstreifen von einander getrennt sind und durch diese festgehalten werden. Dergleichen Batterien sollen vom Erfinder zum Betriebe von Fuhrwerken und Booten benutzt werden.

Akkumulatoren der Electric Power Storage Company. — Als viel benutzte Akkumulatoren sind diejenigen der Electric Power Storage Company in London zu nennen. Dieselben bestehen aus gitterartigen Bleiplatten, deren Hohlräume bei den positiven Platten mit einem Gemenge aus Mennige und Schwefelsäure ausgefüllt sind, während bei den negativen Platten ein Brei aus Bleiglätte und Schwefelsäure, beziehungsweise schwefelsaure Magnesia verwendet ist. Diese Platten werden erst als Elektroden bei starker Wasserzersetzung mittels eines durchgeleiteten elektrischen Stromes benutzt; man bezeichnet diesen Prozeß als das „Formen der Platten“. Hierauf werden dieselben in einem Gefäß von Glas oder Pockholz mit verdünnter Schwefelsäure einander gegenübergestellt. Zwischen zwei leitend verbundenen negativen Platten befindet sich je eine der wiederum leitend verbundenen positiven Platten. Durch kleine Plättchen von vulkanisiertem Kautschuk wird eine gegenseitige Berührung der positiven und negativen Platten verhindert. Die äußersten negativen Platten legen sich mit zwei kleinen Kautschukplättchen gegen zwei Glastafeln. Durch zwei kräftige Kautschukbänder wird das Plattensystem zusammengehalten. Jeder Akkumulator enthält eine negative Platte mehr als positive Platten. Übrigens ist zu bemerken, daß man in England die positiven und negativen Platten umgekehrt bezeichnet, indem man sich dabei nach deren elektrischer Wirkung bei der Formation richtet. Neuerdings

werden positive und negative Leitungen meist einfach durch einen schwarzen, beziehungsweise roten Strich bezeichnet. Die gangbarsten Formen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt *):

Bezeichnung der Zellen mit Anzahl der Platten	Stromstärke		Leistung in Ampère-Stunden	Gewicht der Zelle mit Säure kg	Preis der Zellen in ℳ
	Laden Ampères	Entladen Ampères			
5 S	3—5	1—7	35	4.5	5
11 S	6—11	1—15	75	10	20
17 S	10—17	1—25	120	15	31
23 S	15—23	1—35	160	20	40
35 S	20—35	1—50	250	30	60
7 L	10—12	1—15	110	28	31
11 L	15—20	1—22	185	45	44
15 L	20—25	1—30	330	55	60
23 L	32—37	1—46	500	82	84
31 L	44—50	1—60	660	108	112

Die Akkumulatoren der L-Type dienen für Beleuchtungsanlagen als Lichtquellen oder Regulatoren; auch werden dieselben gern für galvanoplastische Zwecke benutzt. Infolge der großen Dicke und des erheblichen Gewichtes der einzelnen Platten sind diese Art von Zellen besonders zur Aufnahme sehr beträchtlicher Mengen elektrischer Energie geeignet, dagegen ist die zulässige Stromstärke beim Laden und Entladen gering im Verhältnis zum Gewicht. Die Zellen der S-Type geben bei verhältnismäßig geringem Gewicht den größtmöglichen Effekt in der Zeiteinheit und sind daher besonders für solche Fälle geeignet, wo die Apparate zu transportieren sind, so zum Betrieb von Wagen und Booten. Die Lebensdauer dieser Zellen ist aber geringer. Für Glühlampen sind ungefähr 50—55 Zellen der L-Type nötig; für Bogenlampen die Hälfte. Für 1 k Gewicht liefert ein Akkumulator der L-Type ungefähr 6—7 Ampèrestunden oder bei 2 Volts mittlerer Spannung etwa 1/60 Pferdestärke.

*) Elektrotechn. Zeitschrift.

Die Zellen der S-Type, bei denen weniger auf hohe Lebensdauer gesehen wird, leisten nahezu das doppelte. Bei mäßiger Beanspruchung ist die Lebensdauer 900 bis 1000 vollständige Entladungen, also 3 bis 4 Jahre bei täglichem Gebrauche; alsdann ist aber auch nur ein Ersatz der positiven Platten nötig.

129. Einige neuere Arten von Sekundärelementen. — Die Tudor-Akkumulatorenfabrik zu Hagen i. W. Dieselben sind mit dicken Bleiplatten versehen; die negativen Platten haben Löcher, die mit aktivem Material ausgefüllt sind. Wegen ihrer soliden Konstruktion sind diese Akkumulatoren in Deutschland sehr beliebt geworden.

Die Huber-Akkumulatoren, von Huber in Hamburg, sind eine Modifikation der Akkumulatoren der Power Storage Company. Die negativen Platten sind mit quadratischen Blöcken von aktivem Material versehen; diese Blöcke sind durchbohrt, um die wirksame Oberfläche zu vergrößern.

Die Oerlikon-Akkumulatoren sind bei der einen Art mit flüssigem Elektrolyt, in der anderen Art mit gelatinösem Elektrolyt versehen, um die Akkumulatoren transportabel und für den Tramwaywagenbetrieb geeignet zu machen.

Die nachstehende Tabelle giebt (nach La Lumière électrique 1890) einen Vergleich dieser Akkumulatoren nach Versuchen von R. Kopp.

Systeme	Nutzkapazität in Ampère-Stunden	Energie-Wirkungsgrad in Proz.	Plattengewicht in kg	Gewicht des Akkumulators in kg	Gesamtgewicht per Pferdekraftstunde
Oerlikon-Akkumulator mit flüssigem Elektrolyt . . .	126.6	80.6	14.4	20.4	59.8
Solcher mit gelat. Elektrolyt	94.4	72.4	12.0	18.0	75.1
Huber-Akkumulator	82.2	80.7	6.5	12.0	54.5
Julien-Akkumulator	226.8	80.2	20.0	33.0	54.1
Tudor-Akkumulator	85.8	83.7	25.0	39.0	171.2

130. Bestimmung der Wirkungsweise der Sekundärelemente. — Zur Bestimmung der Wirkungsweise eines Sekundärelementes ist der normale Ladungsstrom und die Energieabgabe in Ampères, ferner die Kapazität in Ampèrestunden und der quantitative Wirkungsgrad, die ausnutzbare Energie in Wattstunden, der Wirkungsgrad bezüglich der Energie, d. h. das Verhältnis zwischen der bei der Ladung aufgenommenen und der bei der Entladung unter normalen Verhältnissen ausgegebenen Energie und endlich die nutzbare Leistung der Entladung in Watts maßgebend. Auch das Verhältnis des Gewichtes einer Sekundärbatterie zu ihrer Leistung ist öfters von Wichtigkeit, insbesondere in dem Falle, wo solche Batterien zum Betrieb von Eisenbahnwagen oder Booten dienen sollen. Unter Entladungsstrom versteht man die Maximalstromstärke, welche eine Sekundärbatterie im normalen Betriebe abzugeben vermag.

Die Nutzleistung ist die an den Klemmen der Batterie abzunehmende Anzahl der Volt-Ampères oder Watts.

Die sogenannte Voltasche Kapazität oder Kapazität kurzweg ist die bei normaler Entladung gelieferte Elektrizitätsmenge $Q = It$, das ist die mit der Stromstärke I in der Zeit t der Entladung gelieferte Zahl von Ampèrestunden.

Die verfügbare oder disponible Energie ist die Zahl der Wattstunden, welche eine Sekundärbatterie bei normaler Entladung in den äußeren Stromkreis zu liefern vermag.

Die spezifische Stromabgabe ist das Verhältnis der Leistung zum Plattengewicht der Batterie in Ampères pro Kilogramm.

Die spezifische Kapazität ist das Verhältnis der Kapazität zum Plattengewicht in Ampèrestunden pro Kilogramm.

Der spezifische Nutzeffekt und die spezifische Energie sind beziehungsweise die Verhältnisse der Nutzleistung und der

verfügbaren Energie zum Plattengewicht ausgedrückt in Watts pro Kilogramm oder bezw. in Wattstunden pro Kilogramm.

Eine Sekundärbatterie z. B., welche 16 kg Platten enthält und im normalen Betrieb 30 bis 32 Watts ausgiebt, ist durch die folgenden Konstanten dargestellt:

Spezifische Abgabe .	1 Ampère pro kg
Spezifische Kapazität	6 Ampère pro kg
Spezifische Leistung .	2 Watts pro kg
Spezifische Energie .	25 Wattstunden pro kg*).

Siebenundzwanzigstes Kapitel.

Die thermoelektrischen Batterien.

131. Die Thermoelektrizität. — Thermoelektrizität entsteht, wenn ein geschlossener Leiter (also z. B. ein ringförmiger, an den Enden zusammengelöteter Draht) an einer Stelle erwärmt oder erkältet wird. Am stärksten tritt aber die Thermoelektrizität auf, wenn man an der Lötstelle zweier verbundener Stäbe aus verschiedenen Metallen, d. i. einer geschlossenen thermoelektrischen Kette (z. B. Antimon und Wismut), eine Temperaturdifferenz durch Erwärmung oder Erkältung hervorbringt. Jenachdem eine Erwärmung oder Erkältung an der Kontaktstelle einer thermoelektrischen Kette, oder auch nur einer Stelle in einem geschlossenen Leiter hervorgerufen wird, geht der elektrische Strom nach der einen oder nach der andern Richtung. Die Dauer eines thermoelektrischen Stromes ist gleich der Zeit, während

*) Hospitalier, Traité élémentaire de l'énergie électrique.

welcher die Temperaturdifferenz in der geschlossenen thermoelektrischen Kette unterhalten wird. Das Metall, zu welchem durch die wärmere resp. erwärmte Kontaktstelle der positive Strom hinfließt, wird als das thermoelektrisch positive bezeichnet, wobei die früher bereits erwähnten Umstände bezüglich der Bezeichnung der Polarität des elektrischen Stromes mit in Betracht zu ziehen sind.

Die thermoelektrische Reihe für Temperaturunterschiede bis 100 ordnet sich etwa folgendermaßen:

+ Antimon,	Silber,	Messing,
Eisen,	Kupfer,	Platin,
Stahl,	Blei,	Neusilber,
Zink,	Quecksilber,	— Wismut.

Die aus verschiedenen Versuchen ermittelten thermoelektrischen Reihen stimmen nicht überein, weil die innere Beschaffenheit der Metalle, d. h. deren Struktur, Beimischungen ꝛc., von bedeutendem Einflusse auf die Art und Weise der thermoelektrischen Erregung sind. So nehmen beispielsweise auch die verschiedenen Eisensorten eine verschiedene Stellung in der Reihe ein.

132. **Die thermoelektrischen Ketten im allgemeinen.** — Wird in der thermoelektrischen, beispielsweise aus Antimon- und Wismutdraht gebildeten Kette (Fig. 116 S. 270) die Temperatur der Kontaktstellen a und b durch Erwärmung von a oder durch Erkältung von b in Differenz gebracht, so wird der erregte positiv elektrische Strom in der Richtung des eingezeichneten Pfeiles fließen und in dieser Richtung die Kette durchkreisen. Bei mehr als zwei nacheinander zu einer Kette vereinigten Metallen, wie dies Fig. 117 S. 270 illustriert, wo beispielsweise die Kette außer der Reihenfolge der thermoelektrischen Reihe aus auf einander folgenden Drähten von Eisen, Kupfer und Zink besteht, wird die thermoelektromotorische Kraftwirkung nach den beiden Kontaktstellen der Endglieder der Kette bestimmt. Werden z. B. mit Bezug auf Fig. 117 die Kontaktstellen a und b

gleichmäßig erwärmt, so erhält man einen thermoelektrischen Strom, dessen Richtung und Stärke durch die thermoelektrische Differenz von Eisen und Kupfer bestimmt wird. Ist dabei der Grad der Erwärmung und die Beschaffenheit der beiden Metalle genau dieselbe, so erhält man in den beiden Fällen auch ganz dieselbe elektromotorische Kraftwirkung. Werden

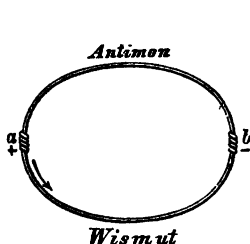


Fig. 116.

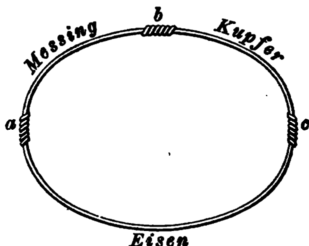


Fig. 117.

dagegen in Fig. 117 die Kontaktstellen a und c gleichmäßig erwärmt, so erhält man einen Strom zwischen Eisen und Messing, der in der Richtung von Messing nach dem Eisen die Kette durchkreist.

Hiernach sind als die Endglieder einer thermoelektrischen Kette diejenigen beiden Metalle zu bezeichnen, welche durch die einzelne Lötstelle verbunden sind, deren Temperatur nur einmal im Schließungskreise vorkommt.

Durchaus nötig ist, daß die übrigen in der thermoelektrischen Kette vorhandenen Kontakt- oder Lötstellen gleiche Temperatur erhalten, weil nur dadurch elektrische Erregungen unter den anderen Metallen vermieden werden.

Die elektromotorische Kraft bleibt dieselbe, gleichviel ob die Metalle zur Herstellung des Kontaktes mit reinen Metallflächen zusammengepreßt oder zusammengelötet sind und ob unter sonst gleichen Umständen die Temperaturdifferenz durch Erwärmung oder durch Erkältung herbeigeführt wird. Vorzuziehen ist jedoch bei der Herstellung thermoelektrischer

Ketten oder Batterien das Zusammenlöten der Metalle, weil alsdann am sichersten inniger Kontakt stattfindet.

Die einfachsten thermoelektrischen Batterien werden so zusammengefügt, daß die beiden heterogenen Metalle stets paarweis durch Lötung mit einander verbunden sind, so daß schließlich zwei heterogene Metalle die Pole oder Elektroden bilden. Werden dann in einer solchen Säule gleichzeitig alle auf der einen Seite liegenden Verbindungsstellen erwärmt, die auf der andern Seite befindlichen aber erkältet, so daß auf eine warme Lötstelle stets eine kalte folgt, so zeigt der von den Polen ausgehende Strom eine der Spannungsdifferenz der beiden heterogenen Metalle entsprechende und der Zahl der hintereinander zusammengefügten thermoelektrischen Elemente proportionale elektromotorische Kraft.

Die durch solche Thermobatterien erzeugten Ströme können auf dieselbe Weise wirken, wie elektrische Ströme überhaupt, d. h. man kann damit Licht, Wärme, chemische und physiologische Erscheinungen hervorbringen, jedoch sind die thermoelektrischen Ströme im allgemeinen schwach und die zu ihrer Erzeugung dienenden Batterien sind schwierig herzustellen und im wirksamen Zustande zu erhalten. Am besten eignen sich zu der Herstellung der Elemente gewisse Legierungen.

133. Versuche mit Thermobatterien. — Munke beschreibt in Poggendorffs „Annalen“ eine von ihm konstruierte Thermobatterie größerer Art, welche die vorerwähnten Wirkungen ganz deutlich hervorbrachte. Dieselbe bestand aus 81 Paaren 34 mm langen, 10 mm breiten und 8 mm dicken Antimon- und Wismutstangen. Die Stangenpaare waren in neun Reihen, jede zu neun Gliedern, vereinigt und hatten mit ihren acht metallischen Verbindungen auf jeder Seite der Säule neunzig Lötstellen. Die unteren Lötstellen befanden sich in einem blechernen Gefäße mit Eiswasser, während die oberen mit einer Kupferplatte bedeckt waren, auf welche glühende Kohlen gelegt wurden. — Andere ebenfalls schon ältere Thermosäulen sind die von Nobili und Melloni,

welche in verschiedenen Formen ausgeführt werden. Bei der einen Form sind die geraden vierseitigen Wismut- und Antimonstäbchen so mit einander verbunden, daß die Lötstellen beiderseits eine quadratische Fläche bilden. Sämtliche Paare sind von einer cylindrischen Büchse umschlossen, in welcher sie unter sich und von dieser durch Ausgießen mit Gips isoliert sind. An dem äußern Umfange des Cylinders enden die beiden Pole der Säule in Schraubenklemmen; derartige Thermosäulen wurden besonders zu Untersuchungen über Berührungsphänomene und zu Strahlungsversuchen, sowie zu sehr genauen Temperaturbestimmungen benutzt.

Marcus verbesserte 1864—1865 die Thermobatterie durch Herstellung gewisser Legierungen, welche nicht nur in der thermoelektrischen Spannungsreihe weit auseinander liegen, sondern auch die Anwendung hoher Temperaturen möglich machen. Für das negative Metall besteht die neusilberartige Legierung aus 10 Gewichtsteilen Kupfer, 6 Teilen Zink und 6 Teilen Nickel (mit einem Zusatz von 1 Teil Kobalt später noch verbessert, so daß man dafür direkt Neusilber benutzen kann). Das positive Metall besteht aus 12 Teilen Antimon, 5 Teilen Zink und 1 Teil Wismut. Von dieser letztern Legierung werden Barren von 16 cm Länge, 2.5 cm Dicke und 2 cm Breite gegossen, welche an das in Form von Blechstreifen hergestellte negative Metall diagonal angeschraubt werden. Zwei Reihen derartig im Zickzack verbundener Streifen werden durch einen Eisenstab zu einem dachartigen Gerüst vereinigt, wie Fig. 118 zeigt. Die unteren Enden der Stäbe werden in kaltes Wasser gestellt und die oberen Enden erhitzt, indem der Eisenstab über mehrere Gasflammen gebracht wird. Die elektromotorische Kraft einer derartigen, aus 18 Paaren bestehenden Thermosäule soll derjenigen eines Daniell-Elementes gleich sein. Durch molekulare Veränderung der Legierungen werden solche Thermosäulen allmählich in ihrer Wirkung geschwächt; außerdem sind dieselben der Sprödigkeit des Metalls wegen leicht zerbrechlich.

Bei der Noeschen Thermosäule bestehen die Elemente ebenfalls aus Neusilber und einer besonderen, geheim=



Fig. 118.

gehaltenen Legierung, aber die Konstruktion ist haltbarer, als bei Marcus. Fig. 119 stellt ein solches Element dar.



Fig. 119.

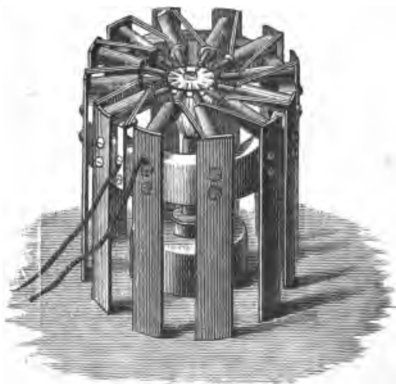


Fig. 120.

In der Mitte ist ein zugespitzter Eisenstift angebracht, um welchen man das positive Metall gießt, in welches die zur

Verbindung der einzelnen Elemente dienenden Neusilberdrähte eingegossen werden. Diese Elemente werden auf Kupferstreifen gelötet und in der durch Fig. 120 S. 273 illustrierten Weise kreisförmig zu einer Säule vereinigt. Auf die eisernen Heizstifte wird eine Glimmerscheibe gelegt, welche zur gleichförmigen Verteilung der Wärme der daruntergestellten Heizflamme dient. Die Kupferstreifen dienen gleichzeitig als Gestell und als Kühlvorrichtung und können zu dem Zweck nötigenfalls in kaltes Wasser gestellt werden. Nach Versuchen des Prof. von Waltenhofen entspricht eine Noesche Thermosäule von 10 Paaren bei Maximalerwärmung in ihrer elektromotorischen Kraft einem Daniell-Element. Mit einer größern Anzahl Noescher Thermosäulen, jede aus 128 Elementen bestehend, hat der Genannte sogar elektrisches Licht erzeugt.

Bei der Clamondschen Thermosäule besteht das negative Metall aus Weißblech und das positive Metall aus einer Legierung von Zink und Antimon, in welches die Enden der Weißblechstreifen eingegossen sind. Die Form der Gußstücke ist sektorenförmig, so daß zehn derselben nach richtiger Zusammensetzung eine Scheibe bilden, die in der Mitte ein Loch hat. Mehrere solche Scheiben bilden durch Aufeinandersetzen eine Säule, wobei durch die Eisenstreifen alle ungeraden Verbindungsstellen am innern Umfange und alle geraden Verbindungsstellen am äußern Umfange des Hohlcylinders der Säule gebildet werden, nach der Art wie Fig. 121 darstellt, worin A die positiven und F die negativen (aus Blechstreifen bestehenden) Elemente sind.

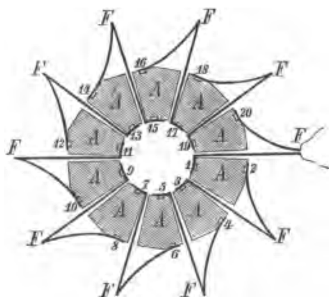


Fig. 121.

Clamonds verbesserte Thermosäule ist so hergestellt, daß auch für starke Temperaturunterschiede, für welche man bisher sehr lange dicke Stäbe anwenden mußte, kurze schwache Stäbe zu benutzen sind. Zu dem Zweck wird eine Zwischenwand aus schlechten Wärmeleitern wie Asbest, Glimmer, gebranntem Thon ꝛc. zwischen die beiden Enden der thermoelektrischen Stäbe eingeschaltet, ohne daß dadurch der metallische Zusammenhang derselben unterbrochen wird. Durch diese Scheidewand wird der Übergang der Wärme vom heißen zum kalten Ende bedeutend vermindert und so die ausdauernde Erhaltung der starken Temperaturdifferenz gesichert.

Die neueste Thermosäule ist von Gülcher konstruiert worden. Das Wesentliche dieser Konstruktion besteht darin, daß eines der Elemente oder auch beide Elemente, aus denen die Thermosäule zusammengesetzt ist, nicht — wie bisher — aus massiven, sondern aus hohlen Körpern gebildet ist. Der Vorteil liegt darin, daß hohle, aus thermoelektrischem Material gebildete Körper nicht nur eine höhere Potentialdifferenz ergeben, sondern auch von wesentlich geringerer Länge sein können, als dies bei massiven Stäben der Fall ist.

Die hohlen positiven Elektroden der Gülcherschen Thermosäule bestehen aus reinem Nickel; dieselben sind in zwei Reihen in einer Schieferplatte befestigt, welche den Abschluß eines unter derselben befindlichen Gaszuführungskanals von Uförmigem Querschnitt bildet. Entsprechende Öffnungen in der Schieferplatte verbinden die Nickelröhrchen mit diesem Kanal, der mit einer Gasleitung verbunden wird. Aus dem Kanal tritt das Gas in die Nickelröhrchen und aus diesen durch je sechs kleine Löcher einer Specksteinhülse, die am Kopfe jedes Röhrchens angeschraubt ist. An dieser Stelle wird das Gas entzündet. Die kleinen blauen Flämmchen erwärmen dann das aus einer kreisförmigen Messingplatte bestehende Verbindungsstück der beiden Elektroden. Das Verbindungsstück ist einerseits mit den Nickelröhrchen hart verlötet, anderseits läuft es nach oben in eine Hülse aus, in

welche die negativen Elektroden eingegossen sind. Letztere haben die Form cylindrischer Stäbe mit seitlichen winkelförmigen Verlängerungen und bestehen aus einer antimonhaltigen Legierung. Bei einer solchen aus 50 Elementen bestehenden Thermosäule ergab sich der innere Widerstand im erwärmten Zustande zu 0.48 Ohm, die Potentialdifferenz zu 4 Volt, der Gaskonsum zu 223 Liter stündlich. Bei der Maximalleistung der Säule im äußeren Stromkreise (dessen Widerstand dann dem innern gleich sein muß) betrug die Stromstärke 4.16 Ampère und demnach die elektrische Arbeit 8.34 Volt-Ampère. Eine solche Thermosäule kann also zwei große Bunsen-Elemente gut ersetzen.

134. Einige interessante Erscheinungen im Gebiete der Thermoelektrizität. — Wenn man die eine Lötstelle eines thermoelektrischen Paares auf konstanter Temperatur erhält und die Temperatur der anderen Lötstelle erhöht, so tritt je nach der Natur der Metalle und dem Temperaturverhältnis der Lötstellen die eine oder die andere von zwei Erscheinungen ein, nämlich entweder wächst die elektromotorische Kraft proportional zur Temperaturdifferenz der beiden Lötstellen, oder bei Überschreitung einer gewissen Temperaturdifferenz findet eine Abnahme der elektromotorischen Kraft statt, worauf dieselbe bei weiterer Zunahme der Temperaturdifferenz Null wird, worauf die elektromotorische Kraft ihre Richtung umkehrt und fortdauerndes aber immer langsameres Wachstum zeigt.

Eine andere bezügliche Erscheinung wurde von Peltier 1834 entdeckt und als Peltierscher Effekt bezeichnet. Wird nämlich ein elektrischer Strom durch die Lötstelle eines thermoelektrischen Paares geführt, so bewirkt die Elektrizitätserregung je nach der Stromrichtung eine Erwärmung oder eine Abkühlung der Lötstelle. Geht z. B. der elektrische Strom von Wismut nach dem Antimon, so kühlt die Lötstelle sich ab; bei umgekehrter Richtung des Stromes erwärmt sich die Lötstelle.

Siebenter Abschnitt.

Die Dynamomaschinen.

Achtundzwanzigstes Kapitel.

Die Grundprinzipien der Dynamomaschinen.

135. **Die magnetelektrische Induktion.** — Die Dynamomaschinen beruhen auf dem von Faraday 1831 entdeckten Vorgange der elektrischen Erregung eines Metalles durch magnetische Einwirkung. Dieser Vorgang wird als magnetelektrische Induktion bezeichnet. Bei den Dynamomaschinen ist nun die Einrichtung derartig getroffen, daß mittels mechanischer Arbeit elektrische Stromkreise durch ein magnetisches Kraftfeld bewegt und dadurch zufolge des Lenzschen Gesetzes mittels Änderung der magnetischen Einwirkung elektrische Ströme erregt werden, deren Wirkung in jedem Moment der Bewegung der induzierten Stromkreise der Veränderung der magnetischen Einwirkung sich entgegenstellt und somit einen entsprechenden Aufwand von mechanischer Arbeit erforderlich macht.

136. **Die Erzeugung der elektromotorischen Kraft.** — Durch den Betrieb einer Dynamomaschine wird demnach mittels mechanischer Arbeit eine elektrische Potentialdifferenz erzeugt, welche einen elektrischen Strom in den durch das Magnetfeld bewegten Stromkreisen hervorruft, der nach dem

Ohmschen Gesetze dem elektrischen Widerstande der bewegten Stromkreise umgekehrt proportional ist. Die auf diese Weise in den bewegten Stromkreisen erregten elektromotorischen Kräfte summieren sich in den Polen oder Klemmen der Dynamomaschine zu einer als Klemmenspannung bezeichneten Potentialdifferenz, welche bei ihrer Einwirkung auf einen äußern Stromkreis in diesem einen wiederum nach dem Ohmschen Gesetze sich regelnden Elektrizitätsstrom hervorruft.

137. Die Hauptteile der Dynamomaschine. — Ganz allgemein besteht eine Dynamomaschine aus zwei magnetelektrisch auf einander einwirkenden Teilen, von denen der eine Teil fest, der andere drehbar ist. Der eine Teil, gewöhnlich der feststehende, bildet das Magnetfeld oder den Induktor. Bei den ältesten Dynamomaschinen, den sogenannten magnetelektrischen Maschinen, bestand dieser Induktor aus permanenten Stahlmagneten. Später ersetzte man diese durch Elektromagnete, welche mittels des von einer besonderen kleinen Dynamomaschine erzeugten elektrischen Stromes erregt wurden, was auch gegenwärtig noch bei den Wechselstrommaschinen geschieht. Dann aber konstruierte man Maschinen, welche mittels des von ihnen erzeugten Gleichstromes ihre Magnete selbst erregten, und bezeichnete diese insbesondere als dynamoelektrische oder Dynamomaschinen. Gegenwärtig wird jedoch die letztere Bezeichnung für alle elektrischen Maschinen gebraucht, in denen durch Induktion mittels mechanischer Arbeit Elektrizität erzeugt und als Elektrizitätsstrom verwendet wird.

Der vom Magnetismus induzierte und dadurch elektrisch erregte Teil der Dynamomaschinen ist der Anker oder die Armatur, jedoch ist in Deutschland die erstere Bezeichnung die gebräuchliche. Der Anker wird in verschiedener Form, als Ring, als Cylinder oder Trommel und als Scheibe oder in Radform hergestellt; derselbe ist mit isoliertem Draht bewickelt, wodurch die sogenannten Ankerwindungen oder Ankerspulen gebildet werden.

Indem der Anker durch das Magnetfeld gedreht wird, wobei seine Drahtbewickelung sich abwechselnden Plus- und Minuspolen (Nord- und Südpolen) der Feldmagnete vorüber bewegt, werden in demselben im allgemeinen elektromotorische Kräfte und infolgedessen auch Elektrizitätsströmungen von abwechselnd entgegengesetzter Richtung erzeugt, welche entweder direkt als Wechselströme oder mittels sogenannter Kommutation in gleicher Richtung als Gleichströme in den äußeren Stromkreis übergeführt werden.

Man unterscheidet mit Bezug hierauf Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen.

138. **Die magnetelektrischen Maschinen.** — Der älteste Typus der magnetelektrischen Maschinen wird durch die von Pixii 1832 erfundene, dann von Clarke, Stöhrer und Werner Siemens verbesserten Konstruktionen dargestellt.

Fig. 122 zeigt die Hauptteile einer solchen insbesondere für ärztliche Zwecke und Laboratoriumsversuche gebauten kleinen Maschine. Die beiden mit Eisenkernen versehenen Drahtrollen a b bilden den Anker.



Fig. 122.

Im Jahre 1856 verbesserte Werner Siemens die magnetelektrische Maschine durch seinen sogenannten Doppel-T-Anker (Fig. 123 S. 280). Derselbe besteht aus einem im Querschnitt I förmigen Eisenkörpers A, der aus einem cylindrischen Stück hergestellt ist, in welches beiderseits Nuten zum Einwickeln des isolierten Kupferdrahtes eingehobelt sind. Die über die Ankerenden hinweggeführte Drahtlage ist mit den Messingscheiben E und P überdeckt. C ist der zur Stromabnahme mittels zweier Blattfedern dienende Kommutator. Diese Ankerform wird gegenwärtig noch für die sogenannten

Magnetinduktoren benutzt, welche zur Erzeugung der Betriebsströme für die elektrischen Eisenbahnsignalapparate dienen.

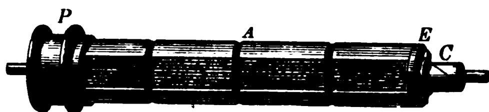


Fig. 123.

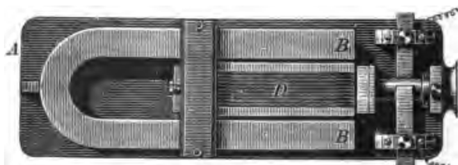


Fig. 124.

Fig. 124 zeigt ungefähr die Form eines derartigen Maschinchens. D ist der zwischen die Magnetpole B gelagerte Anker.

Neunundzwanzigstes Kapitel.

Ring- und Trommelanker.

139. Die Maschine mit Ringanker. — Die erste dieser Maschinen wurde von Gramme in Paris mit Benutzung des von Prof. Pacinotti bereits 1864 bei einer magnetelektrischen Maschine benutzten Ringankers im Jahre 1870 gebaut, wobei Gramme zuerst den Draht in ununterbrochener Windung in symmetrischen Abteilungen um den Ring legte.

Die Stromrichtungen in einem solchen zwischen zwei entgegengesetzten Magnetpolen N und S rotierenden Ringanker werden in einfacher Weise durch das Schema

Fig. 125 dargestellt. Die Stellen a und b, wo die entgegengesetzt gerichteten Ströme der in der Drahtbewickelung des Ringankers erzeugten Elektrizität zusammentreffen, heißen die neutralen Punkte und an diesen wird ein in gleicher Richtung verbleibender Strom in den äußern Stromkreis a c b übergeleitet.

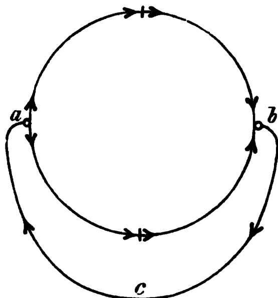


Fig. 125.

Durch die Anordnung des Grammeschen Ringankers wird eine Erhöhung der Potentialdifferenz erzielt, indem ein und derselbe spiralförmig um einen ringförmigen Eisenkern gewickelte isolierte Draht wiederholt durch dasselbe magnetische Feld geführt wird.

Die Anordnung dieses Ringankers ist in Fig. 126 schematisch dargestellt. Der aus weichem, draht- oder

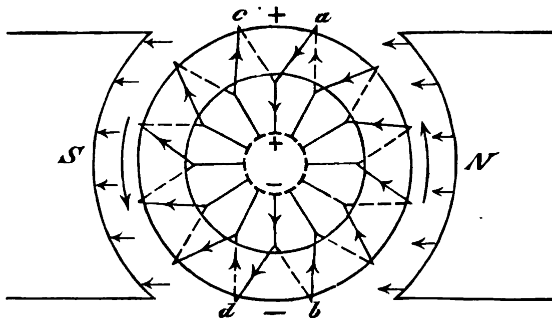


Fig. 126.

lamellenartig zusammengelegtem Eisen gebildete, auf der Maschinenwelle sitzende Ringanker ist mit einem zusammenhängenden isolierten Kupferdrahte bewickelt, dessen Enden

wiederum mit einander verbunden sind, so daß eine endlose Drahtspirale gebildet ist. Der so bewickelte Ringanker wird alsdann zwischen dem Nord- und Südpole eines Elektromagnets gedreht. Bei der dargestellten Anordnung und Drehungsrichtung wird der elektrische Strom in allen Teilen der Drahtspirale, die sich zwischen dem Eisenring und dem Nordpole des Magnets befinden, derart induziert, daß der Strom, nach den Regeln der Induktion, gegen den Beschauer des Bildes zu gehen strebt, während in den Teilen des Drahtes, die dem Einflusse des Südpoles unterworfen sind, der Strom die entgegengesetzte, das ist vom Beschauer weggewendete, Richtung hat. Verfolgt man die um den Eisenkern gelegten Drahtwindungen im Einzelnen, so ergiebt sich aus der Art und Weise der Bewickelung, daß die wirksamen Teile, die sich zwischen dem Ankereisen und dem Magnetpole befinden, durch diejenigen des Drahtes, die sich innerhalb des Ringankers befinden, hintereinander geschaltet oder in Reihenschaltung (also auf Spannung) verbunden sind, oder mit anderen Worten, der Draht ist so um den ringförmigen Eisenkern gewickelt, daß er durch den inneren Teil des Ringes wiederholt zurückkehrt und demnach auch wiederholt durch dasselbe Magnetfeld hindurchgeht. Die kleinen induzierten Potentialdifferenzen oder elektromotorischen Kräfte, die in jedem dieser wirksamen Drahtteile induziert werden, summieren sich also hintereinander zu einer entsprechend erhöhten Potentialdifferenz und demzufolge auch entsprechend verstärkten elektromotorischen Kraft. Hieraus folgt, daß an den beiden Punkten a und b, wo der in der rechts befindlichen Hälfte der Drahtspirale erzeugte elektrische Strom in das magnetische Feld des Nordpoles unten eintritt und oben austritt, die Gesamtpotentialdifferenz oder elektromotorische Gesamtkraft gleich der Summe aller kleinen, in den einzelnen Windungen erregten Potentialdifferenzen oder elektromotorischen Kräfte ist. Die Potentialdifferenz, die praktisch in einem einzelnen Draht durch dessen Bewegung in einem magnetischen Felde

erzeugt werden kann, ist äußerst gering und beträgt in den gewöhnlichen Induktionsmaschinen nur etwa ein Volt; nur ausnahmsweise kann dieselbe (und zwar nur mit Überanstrengung der Maschinen) auf einige Volts gesteigert werden. Es ist deshalb nötig, die Maschinen so einzurichten. daß die aufeinanderfolgenden Teile des Drahtes gleichzeitig durch dasselbe Magnetfeld gehen, damit man nicht zu große und dadurch kostspielige Magnete nötig hat, oder die Maschine mit zu großer, den Betrieb unsicher machender Geschwindigkeit umtreiben muß. Hieraus folgt, daß der Anker mit zahlreichen Drahtwindungen versehen sein muß, deren Zahl um so größer sein muß, mit je höherer Spannung der erzeugte Strom durch den Stromkreis getrieben werden soll.

Da die kleinen Potentialdifferenzen der reihenweis geschalteten Ankerwindungen sich nach dem bekannten Gesetz der Reihenschaltung summieren, so folgt, daß die in einem solchen Anker erzeugte Potentialdifferenz oder Gesamtspannung ungefähr der Anzahl der um das Ankereisen gelegten Drahtwindungen proportional ist. Es folgt hieraus, daß man zur Vergrößerung der Spannung in einer gewissen Maschinentype nur nötig hat, die Anzahl der Drahtwindungen proportional zur gewünschten Erhöhung der Spannung zu vermehren, vorausgesetzt, daß damit nicht die Veränderung anderer die Potentialdifferenz beeinflussender Teile verbunden ist. Es ist indessen darauf aufmerksam zu machen, daß diese Spannung im innern Stromkreise der Maschine nicht mit der Klemmenspannung der mit einem äußern Stromkreise verbundenen Maschine identisch ist, indem die Klemmenspannung von der im äußern Stromkreise herrschenden Stromstärke und dessen Widerstande nach dem Ohmschen Gesetz abhängig ist. Selbstverständlich behält aber das Ohmsche Gesetz auch für den innern Stromkreis der Maschine seine Gültigkeit. In jedem Falle ist die Klemmenspannung einer Maschine kleiner als deren innere Potentialdifferenz oder elektromotorische Kraft, die von den oben aufgeführten Bedingungen abhängig ist.

Mit Bezug auf Fig. 126 ist zu bemerken, daß in dem Teile a b des um den Eisenkern fortlaufenden Drahtes, der sich unter dem Einflusse des Nordpoles befindet, die Summe der kleinen Potentialdifferenzen bei a einen positiven Pol und bei b einen negativen Pol hervorruft. Bei der andern Hälfte der Drahtspirale, die sich unter dem Einflusse des Südpoles des Magnetfeldes befindet, ist dasselbe der Fall, nur mit dem Unterschiede, daß die Richtung des induzierten Stromes umgekehrt ist, so daß ein positiver Pol bei c und ein negativer Pol bei d hervorgerufen wird, was aus den früher auf S. 114 befindlichen Bemerkungen über Elektromagnete sich sofort ergiebt. Die beiden Ströme wirken daher an den Stellen der Drahtspirale, die sich außer dem Bereiche der beiden induzierenden Magnetpole befinden, einander entgegen. Es sind dies die sogenannten neutralen Punkte der Ankerbewicklung, und da diese Punkte bei der Bewegung des Ankers unter sonst gleichen Umständen ihre Stellen im Raume behaupten, so sind an diesen Punkten die den Strom abnehmenden Kontaktfedern oder sogenannten Bürsten anzubringen. Es kann dies, wie bei gewissen neueren Maschinentypen, dadurch erreicht werden, daß man den Drahtwindungen am äußern Umfange des Ringes eine blanke Metallfläche giebt und die Bürsten direkt am äußern Ringumfange anlegt. Bei den meisten Maschinentypen werden jedoch die Drahtwindungen des Ankers mit einem auf der Welle sitzenden Kommutator oder Kollektor verbunden, auf welchem die Bürsten schleifen.

Für die Gleichstrommaschine mit Ringanker hat aus den angeführten Gründen der Kommutator nur eine rein mechanische Bedeutung, indem man denselben ganz entbehren kann, weil der Strom sich auch am Umfange des Ringes selbst mittels der Kontaktbürsten abnehmen läßt. Man bezeichnet deshalb auch hier den Kommutator besser als Kollektor.

Aus Fig. 126 ist ersichtlich, daß bei der Ringbewicklung die beiden Hälften der zusammenhängenden Drahtspirale

mit Bezug auf die Stromabnahme neben einander geschaltet sind, so daß jede Hälfte der Spirale dieselbe Spannung, aber nur die halbe Strommenge zur Maschinenleistung liefert.

Aus den obigen Bemerkungen ergeben sich die folgenden praktischen Regeln:

Da die beiden Hälften der Ringankerbewickelung infolge ihrer Anordnung neben einander geschaltet sind, so ist es eine wesentliche Bedingung, daß die Spannungen in beiden Hälften gleich sind, weil bei einem Spannungsunterschiede in diesen Hälften unter Umständen ein Strom in umgekehrter Richtung durch den Ankerdraht gehen kann, und da dieser umgekehrte Strom im äußern Stromkreise nicht zur Geltung kommt, so würde dadurch ein leicht vermeidlicher Energieverlust herbeigeführt werden. Die Bürsten müssen deshalb genau diametral zu einander angeordnet und das magnetische Feld muß in beiden Hälften genau gleich sein, das heißt: es soll in beiden Hälften dieses Feldes dieselbe Anzahl von Kraftlinien zur Wirkung kommen, was natürlich auch bedingt, daß die Ankerbewickelung eine ringsum gleichmäßige ist.

Da die beiden Hälften der Ankerbewickelung parallel geschaltet sind, so folgt, daß der wirkliche Widerstand des ganzen Ankers von Bürste zu Bürste gleich der Hälfte des Widerstandes der Bewickelung des halben Ringes, das heißt gleich einem Viertel des Widerstandes des ganzen Ankerdrahtes ist. Da ferner der ganze von der Maschine erzeugte Strom sich im Anker in zwei Teile teilt, so braucht der Drahtquerschnitt nur für den halben Strom der Maschine ausreichend zu sein. Indem die beiden Bewickelungshälften des Ankers parallel geschaltet sind, ist natürlich die Gesamtpotentialdifferenz nur die Hälfte von derjenigen, welche bei derselben Drahtmenge, Windungszahl, Umdrehungsgeschwindigkeit und Feldstärke bei Hintereinanderschaltung der beiden Bewickelungshälften zu erreichen wäre. Da aber bei der Parallelschaltung der beiden Bewickelungshälften die

doppelte Stromstärke im Vergleich zur Hintereinanderschaltung der Bewickelungshälften erzielt wird, so ist in beiden Fällen die erzeugte Energiemenge dieselbe. Könnten die beiden Bewickelungshälften hinter einander geschaltet werden, so müßte der Draht etwa den zweifachen Querschnitt haben und die ganze Maschine müßte entsprechend größere Abmessungen erhalten.

So viel bekannt, ist in Amerika oder England eine Vorrichtung zur Hintereinanderschaltung der beiden Bewicklungshälften des Gramme-Ringes vor einiger Zeit patentiert worden, jedoch ist der dadurch auf Kosten der einfachen Anordnung erzielte Vorteil zu gering, um dieser Vorrichtung praktischen Wert zu verleihen *).

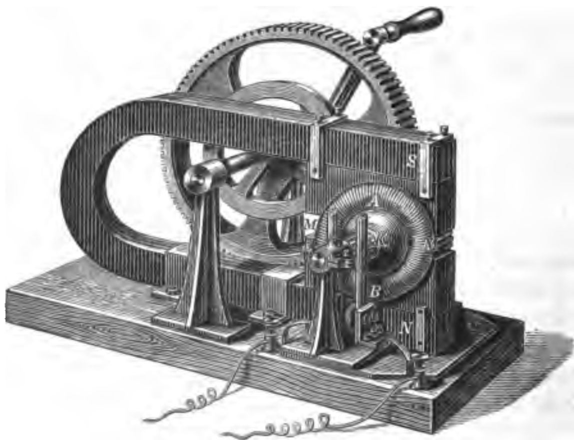


Fig. 127.

Die Grammesche Ringmaschine wurde zuerst als magnetelektrische Maschine ausgeführt. Eine derartige Maschine für Handbetrieb ist in Fig. 127 dargestellt. Zwischen den

*) Carl Hering, Principles of Dynamo-Electric Machines. New York 1888.

mit ausgehöhlten Schuhen versehenen Magnetpolen SN befindet sich der drehbare Ringanker, der bei A und B seine Pole und bei MN seine neutrale Zone hat. BB sind die stromabnehmenden Bürsten, welche beiderseits am Kommucator K anliegen und den Strom in die Leitung abführen.

140. Die Maschinen mit Trommelanker. — Der Trommelanker ist aus dem Siemensschen sogenannten Doppel-T-Anker (Fig. 123) entstanden; seine Konstruktion und Wirkungsweise ist durch Fig. 128 illustriert. Der Kern dieses Ankers

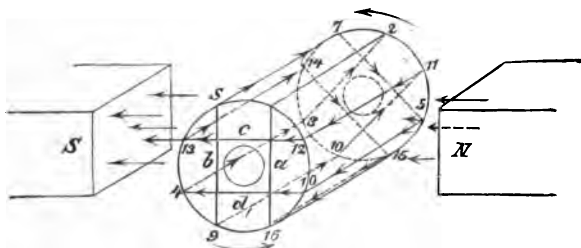


Fig. 128.

besteht aus einem hohlen, beiderseits geschlossenen und auf einer Welle befestigten Eisencylinder, um welchen der Draht der Länge nach in diametralen oder annähernd diametralen Windungen herumgelegt ist, so daß die ganze Oberfläche des Cylinders oder der Trommel mit Drahtwindungen bedeckt wird. Auf diese Weise wird bei jeder Umdrehung der Trommel zwischen den Magnetpolen jede einzelne Drahtwindung stets gleichzeitig der Einwirkung der beiden entgegengesetzten Magnetpole unterworfen, so daß infolge des Durchschneidens der magnetischen Kraftlinien beiderseits in jeder Drahtwindung Ströme von entgegengesetzter Richtung induziert werden, die sich aber, wie die Abbildung Fig. 128 erkennen läßt, zu einem gleichgerichteten Strome summieren. Wie diese entgegengesetztgerichteten Ströme

durch den Kommutator zu einem gleichgerichteten Strome summiert werden, läßt Fig. 129 erkennen. Die Art und Weise der Überführung der Drähte an den Stirnseiten des Trommelankers und deren Verbindung mit dem Kommutator ist aber sehr verschiedenartig bei den verschiedenen Typen der Trommelmaschinen. Die in Fig. 129 sichtbaren punktierten Linien deuten die Überführung der Drähte an der dem Kommutator entgegengesetzten Stirnseite des Trommelankers an. In diesem Falle sind sechzehn Abteilungen auf dem Trommelumfange und also acht Spulen der Trommelbewickelung vorhanden und folglich ist der Kommutator

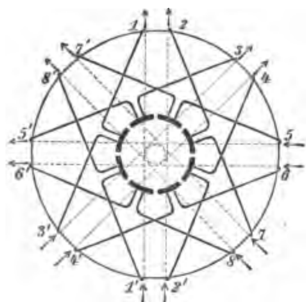


Fig. 129.

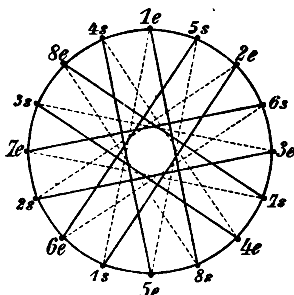


Fig. 130.

achtteilig. Der ganze Kreisumfang ist in sechzehn Teile geteilt und die Verbindung der Drähte mit dem Kommutator ist derartig, daß immer sechs Teilpunkte zwischen zwei mit einem Kommutatorsektor verbundenen Drahtspulen liegen. Dieser Bewickelungsart liegt überhaupt die Regel zu Grunde, daß die Zahl der Teilpunkte zwischen zwei verbundenen Drahtspulen zwei weniger als die Anzahl dieser Spulen beträgt.

Eine einfachere Bewickelung des Siemensschen Trommelankers ist in Fig. 130 dargestellt; es sind dabei ebenfalls acht Spulen vorhanden. Die mit e bezeichneten Ziffern

sind die Eintrittspunkte des Stromes (d. h.: der Strom fließt in diesen Punkten in die senkrecht zur Zeichnungsfläche stehenden Bewickelungsdrähte des Trommelumfanges in abgewendeter Richtung vom Beschauer); die mit s bezeichneten Ziffern bedeuten die Austrittspunkte des Stromes (d. h.: die Stromrichtung ist hier als aus der Zeichnungsfläche herausgehend zu betrachten).

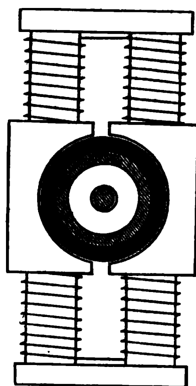


Fig. 131.

Jeder von einer Eintrittsstelle nach einer Austrittsstelle gehende, parallel zur Trommelachse gerichtete Draht, z. B. der von 2 e nach hinten, dann über die hintere Stirnfläche der Trommel hinweg von 1 s wieder nach vorn gehende Draht ist hier, ähnlich wie bei dem Gramme-Ring mit dem Kommutator (der hier an der vorderen Stirnfläche der Trommel zu denken ist) verbunden. Fig. 131 zeigt schematisch die Gesamtanordnung der Elektromagnete (Induktoren) und des von deren Polschuhen eingeschlossenen Ankers.

Dreißigstes Kapitel.

Die Gleichstrommaschinen.

141. Das dynamoelektrische Prinzip. — Das Prinzip der Gleichstrommaschinen beruht darin, daß die zur Erregung des Ankers dienenden Elektromagnete durch den in der Maschine erzeugten elektrischen Strom erregt werden. Anfangs wird durch den in den Eisenkernen dieser Magnete vorhandenen geringen remanenten Magnetismus, der dem

Eisen von Natur anhaftet oder durch eine einmalige Magnetisierung darin erregt worden ist, nur ein entsprechend schwacher Strom im Anker erzeugt. Durch diesen Strom wird aber der Magnetismus der Elektromagnete schon etwas verstärkt. So setzt sich die Wirkung und Gegenwirkung in rascher Folge fort, bis die Maschine mit wachsender Umdrehungszahl beim Erreichen ihrer normalen Tourenzahl auch ihre normale Stromstärke erlangt hat.

Die erste Dynamomaschine nach dem von Werner Siemens 1867 entdeckten elektrodynamischen Prinzip wurde vom Engländer Ladd mit Benutzung des Siemensschen Doppel-T-Ankers gebaut. Fig. 132 illustriert die Benutzung des dynamoelektrischen Prinzips an einer Ringankermaschine.

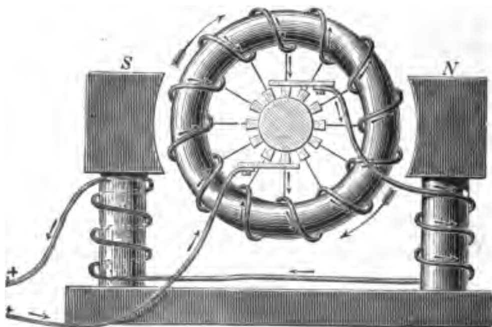


Fig. 132.

Der aus weichem Eisen bestehende, mit einer kontinuierlichen Spirale isolierten Drahtes umwundene Ring rotiere beispielsweise in der Pfeilrichtung zwischen den Polschuhen S N eines Elektromagnets. Jede Windung (beziehentlich Drahtspule) des Ringankers ist durch einen radialen Draht mit einem auf der Welle liegenden isolierten Kupferstäbchen leitend verbunden. Diese konzentrisch um die Welle liegenden Kupferstäbchen bilden den Kollektor, auf welchem diametral in

der Richtung der neutralen Mittelinie zwei Kontaktfedern oder sogen. Bürsten streichen, welche den in der Richtung der kleinen Pfeile im Ringdrahte zirkulierenden Strom aufsammeln und je durch einen Draht nach außen leiten. Der Leitungsdraht der einen Bürste bildet die erregende Spirale des Elektromagnets und geht erst dann in den äußeren Stromkreis über, so daß der in dem Ringanker zuerst von dem schwachen remanenten Magnetismus der Magnetpole S N induzierte Strom gleichzeitig den induzierenden Elektromagnet umkreist, wodurch sehr rasch — nach dem dynamoelektrischen Prinzip — die Maschine auf ihre Maximalwirkung gebracht wird. Bei den praktisch ausgeführten Maschinen umfaßt jeder Polschuh fast die ganze betreffende Hälfte des Ringankers.

142. Die Gramme-Maschine. — Fig. 133 stellt die Konstruktion des Ringankers der Gramme-Maschine dar. Der

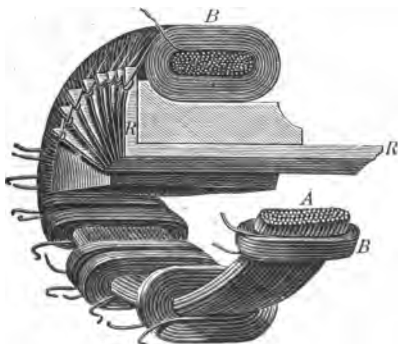


Fig. 133.

teilweis im Durchschnitt AB dargestellte Ring ist aus weichem geglühten Eisendraht gebildet. Die daraufsitzenden Spulen B aus isoliertem Kupferdraht sind, im fertigen Zustande des Ankers, dicht aneinandergeschoben und in der angedeuteten Weise mit winkelförmigen Kupferstreifen verbunden, die

unter sich isoliert sind und isoliert auf der Ankerwelle sitzen, um den Kommutator zu bilden.

Fig. 134 zeigt eine vollständige Grammesche Ringmaschine älterer Konstruktion, wie solche aber auch jetzt noch für Beleuchtungszwecke in Frankreich benutzt wird.

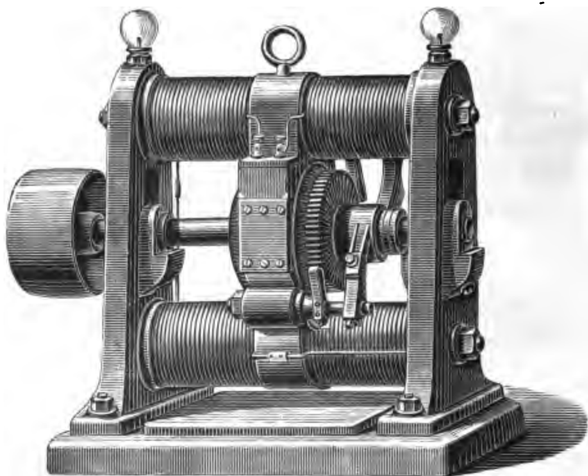


Fig. 134.

143. Die Schuckertsche Flachringmaschine. — Um die Wirkung des Ringes durch bessere Ausnutzung des magnetischen Feldes zu erhöhen, wurden von Schuckert in Nürnberg seinerzeit die sogenannten Flachringmaschinen gebaut, von denen Fig. 135 eine Ansicht giebt. Der angenähert scheibenförmige Ringanker ist beiderseits von den lappenförmigen Polschuhen der Elektromagnete umgeben, so daß ein weit größerer Teil des Ankerdrahtes, als bei der älteren Gramme-Maschine, die Kraftlinien des Magnetfeldes durchschneidet und somit eine bessere Ausnutzung des Magnetfeldes erzielt wird.

Außerdem erhitzt sich dieser Anker auch bei starker Beanspruchung nicht so leicht wie der Gramme-Anker, indem die Luft an den flachen Seiten kräftig durchströmt.

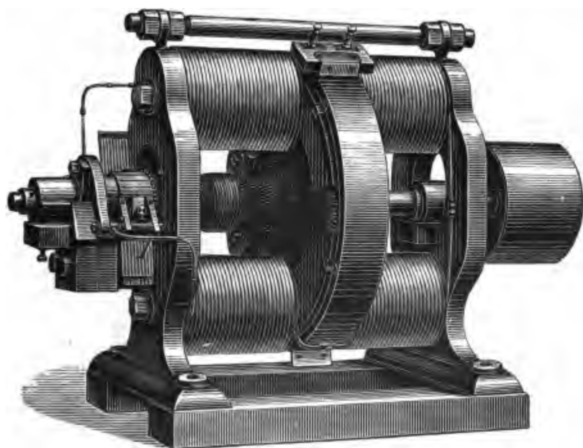


Fig. 135.

Eine noch andere Form hat die Ringmaschine in der Gülcher-Maschine Fig. 136 S. 294 erhalten. Der Anker ist hier der Scheibenform noch näher gebracht, als bei der Schuckertschen Maschine. Um innerhalb des Ringes die Spulen unterzubringen, müssen dieselben am äußeren Umfange des Ringankers ziemlich weit auseinandergerückt werden. Hierdurch wird zugleich der Vorteil erreicht, daß der Anker noch weniger leicht heißläuft, als bei der Schuckert-Maschine, dafür aber auch wiederum der Nachteil herbeigeführt, daß die Maschine im Verhältnis zu ihrer Größe weniger Draht auf dem Anker hat, so daß sie viel Touren für eine gewisse Leistung machen muß. Es wird angegeben, daß die Maschine bei etwa 1000 Umdrehungen in der Minute und etwa zehn Pferdestärken Betriebskraft sechs

parallel geschaltete Gülchersche Bogenlampen von je etwa 1000 Kerzen Lichtstärke betreibt, wobei aber wohl die Leuchtkraft der Lampen etwas hoch bemessen ist.

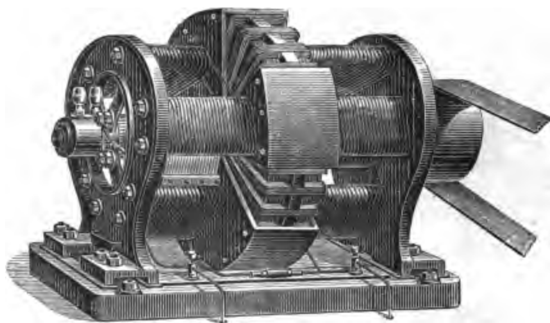


Fig. 136.

144. Die Siemenssche Trommelankermaschine. — Eine Trommelmaschine älterer Konstruktion stellt Fig. 137 dar.

Von den vier Kommutatorbürsten dienen zwei zum Aufnehmen des in die Magnetbewickelung zu führenden Bruchteils des Stromes, während die beiden anderen Bürsten, die den neutralen Stellen des Ankers entsprechen, den Hauptteil des Stromes aufnehmen und in den äußeren Stromkreis führen. Diese Maschine zeichnete sich gegenüber den älteren Gramme-Maschinen durch größere Leistungsfähigkeit aus. Es wird angegeben, daß eine derartige Siemens-Trommelmaschine mittlerer Größe von 200 kg Gewicht bei 700 Umdrehungen in der Minute und 3.5 Pferdestärken Betriebskraft eine Lichtstärke von 4000 Normalkerzen geliefert habe. Eine kleinere Maschine von 115 kg Gewicht soll bei 900 Umdrehungen und 1.25 Pferdestärken ein Licht von 1400 Normalkerzen erzeugt haben. Bei den größten Modellen

dieser Trommelmaschinen wurden die Elektromagnete horizontal angeordnet.

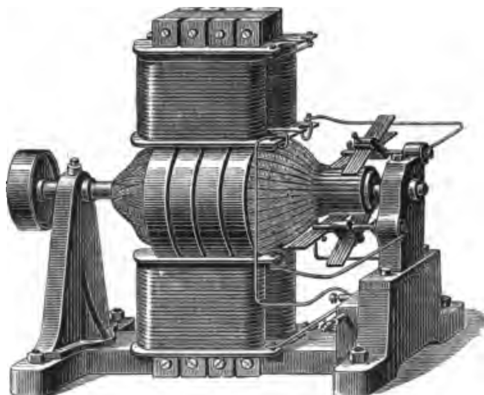


Fig. 137.



Fig. 138.

Fig. 138 zeigt eine der neuesten Formen der von der Firma Siemens & Halske gebauten Trommelmaschinen

(Type H). Der Trommelanker hat einen aus weichen dünnen Eisenblechscheiben zusammengesetzten Kern. Der Anschluß der Ankerdrähte an den Kommutator ist so angeordnet, daß Anfang und Ende jeder Drahtwindung mit zwei benachbarten Kommutatorsegmenten verbunden ist und alle Wickelungen hintereinander geschaltet sind.

Es wird diese Maschine bis zu etwa 100 elektrischen Pferdestärken Betriebsleistung gebaut.

145. Verschiedene Typen von Gleichstrommaschinen. — Die Abbildungen Fig. 139 bis 145 zeigen schematisch einige der jetzt gebräuchlichen, nach den angeführten Grundsätzen gebauten Dynamomaschinen.

Fig. 139. Zweischenklige Trommelmaschine der Firma Siemens & Halske (Berlin); eine ähnliche Form wird auch von Gramme und von Kapp gebaut.

Fig. 140. Einschenklige Trommelmaschine. Eine in England aufgekommene Form.

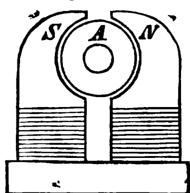


Fig. 139.

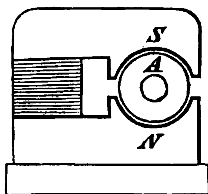


Fig. 140.

Fig. 141. Zweischenklige Trommelmaschine von Edison-Hopkinson.

Fig. 142. Vierpolige Trommelmaschine der Berliner Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft.

Fig. 143. Zweischenklige Trommelmaschine von Lahmeyer (Aachen).

Fig. 144. Zweischenklige Trommelmaschine von Mather & Platt (Manchester), Maschinenfabrik Oerlikon

(Schweiz) und Maschinenfabrik Eßlingen (frühere elektrotechnische Fabrik Cannstatt).

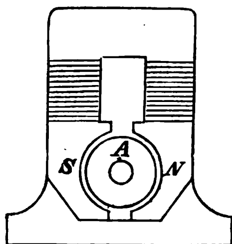


Fig. 141.

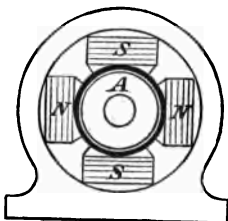


Fig. 142.

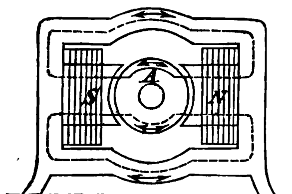


Fig. 143.

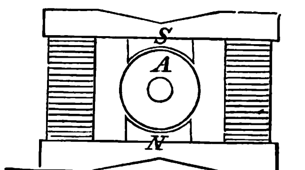


Fig. 144.

Fig. 145. Innenpol-Ringmaschine von Siemens & Halske (Berlin); eine ähnliche Form wird von Fein (Stuttgart), sowie von Ganz & Co. (Pest) gebaut.

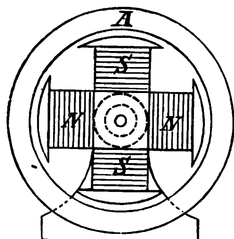


Fig. 145.

Bei den neuesten Formen der Dynamomaschinen ist der Grundsatz maßgebend gewesen, dem Anker möglichst viel magnetische Kraftlinien zuzuführen. Dieser Zweck erforderte die Bildung eines möglichst kräftigen Magnetfeldes, einen

möglichst geringen Luftraum zwischen Anker und Magnetpolen, kurze dicke Magnetschenkel, eine Form des Gestells, wodurch der Verlauf der Kraftlinien möglichst erleichtert und deren Verlust vermieden wird; ferner mußte aber auch der Eisenkern des Ankers möglichst massig und so geformt werden, daß ein möglichst dichter Anschluß an die Magnetpole stattfinden kann, so daß der Anker imstande ist, die Kraftlinien des Magnetfeldes vollständig aufzunehmen. Um das Ankereisen möglichst dicht an die Magnetpole zu bringen, legte man die Drahtbewickelung entweder in Rinnen ein, indem man sogenannte Zahnanker herstellte, oder man zog die Drähte durch Durchbohrungen, die dicht unter dem Umfang des eisernen trommelartigen Ankers angebracht sind. Behält man die Oberflächenbewickelung des Ankers bei, so erfordert diese eine besonders sorgfältige Ausführung, damit die Oberfläche den kreisrunden Querschnitt in allen Teilen beibehält und somit der Umfang des Ankers bis auf wenige Millimeter Entfernung von den Magnetpolen gebracht werden kann, ohne daß die Gefahr des Anstreifens seiner Bewicklung an den Magnetpolen eintritt, wodurch natürlich die Ankerbewickelung vernichtet werden würde.

Die zweischenklige Trommelmaschine von Edison-Hopkinson (Fig. 141) ist die umgekehrte Form der vorher beschriebenen Maschine von Siemens & Halske. Diese Form bedingt die Aufstellung der Magnete auf einer die Pole magnetisch isolierenden Grundplatte, wozu eine Platte aus Zinkguß gewählt wird. Bemerkenswert bei dieser Form ist das wichtige Zwischenstück, welches die Magnetschenkel oben mit einander verbindet. Der große Querschnitt dieses Zwischenstückes ist nötig, um den Widerstand für die durch dasselbe verlaufenden magnetischen Kraftlinien möglichst zu vermindern. Die Maschine wird aber dadurch ziemlich schwerfällig im Vergleich zu der Form Fig. 139. Durch die niedrige Lagerung des Trommelankers wird jedoch in vorteilhafter Weise die Stabilität erhöht, indem hohe

Lagerböcke vermieden sind. Die Maschine eignet sich zu direkter Kuppelung mit der Dampfmaschine.

Eine solche von Mather & Platt gebaute Edison-Hopkinson-Dynamomaschine soll bei 130 Umdrehungen pro Minute 110 Volt und 475 Ampère (also 52250 Volt-Ampère) mit etwa 110 Pferdestärken der Dampfmaschine liefern.

Die vierpolige Trommelmaschine der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft (Berlin),

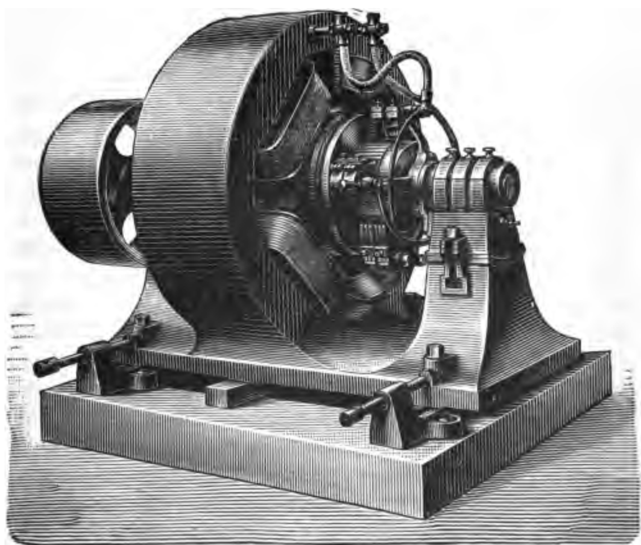


Fig. 146.

Modell G, hat einige Ähnlichkeit mit der älteren Zipernowskischen Trommelmaschine, indem innerhalb des ringförmigen Magnetgestells vier Pole mit abwechselnd entgegengesetzter Polarität auf einander folgen. Die in Fig. 146 dargestellte Maschine der genannten Gesellschaft

ist mit Rücksicht auf guten Wirkungsgrad bei möglichst geringen Herstellungskosten gebaut. Die geringen Herstellungskosten bedingen einen ziemlich raschen Umlauf, um das Magnetfeld möglichst auszunutzen. Die vier radialen Schenkel, auf denen die Spulen sitzen, sind kurz und von vierseitiger gedrungener Form. Der Trommelanker ist anstatt des Ringankers gewählt, weil er sich leichter auf der Welle befestigen läßt und einen geringeren Ankerwiderstand besitzt. Die Wickelung des Ankers besteht aus einer einzigen Lage vierkantiger Kupferstreifen, die an den Enden mit einander und mit dem Kommutator verlötet und derartig angeordnet sind, daß die Luft freien Durchgang an den beiden Ankerenden hat, wodurch der Anker vor Überhitzung möglichst gesichert ist. Eine Eigentümlichkeit dieser Maschine besteht in der Anwendung der sogenannten Polbuchse (D. R.-P. Nr. 47757). Diese Buchse besteht aus einem ziemlich starken gußeisernen Hohlcylinder, der die dem Trommelanker zugekehrten vier Magnetpole mit einander verbindet, so daß der Anker innerhalb dieser Buchse läuft. Es wird so ein magnetischer Nebenschluß zu dem Ankereisen von relativ kleinem Leitungsvermögen hergestellt und eine möglichst sanfte Einwirkung der Pole bei dem Polwechsel auf den Ankerdraht erhalten, wodurch die Funkenbildung am Kommutator beseitigt wird. Bei der elektrischen Abmessung der Maschine war das Bestreben maßgebend, einen hohen Wirkungsgrad nicht nur bei der Vollbelastung, sondern auch bei geringerer Beanspruchung zu sichern.

Diese Maschine wird in fünf Modellnummern zu etwa 30 bis 108 Pferdestärken bei 1000 bis 550 Touren in der Minute für Spannungen von 65 bis 150 Volt und Stromstärken von 120 bis 850 Ampère ausgeführt.

Die Maschine von Lahmeyer (Fig. 147) wird von den Deutschen Elektrizitätswerken in Aachen gebaut; sie ist besonders mit Rücksicht auf Erzielung eines möglichst geringen Widerstandes der magnetischen Kraftlinien im Gestell und Ankereisen gebaut. Der Verlauf des magnetischen Stromkreises ist in Fig. 143 durch punktierte

Linien und Pfeile angedeutet. Fig. 147 zeigt eine etwas andere Form dieses Systems; diese Maschine wird als Modell NG für eine Betriebskraft von etwa 3 bis 17 Pferdestärken in fünf Abstufungen von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft (Berlin) für Spannungen von 65 bis 150 Volt und Stromstärken von 15 bis 180 Ampères ausgeführt.

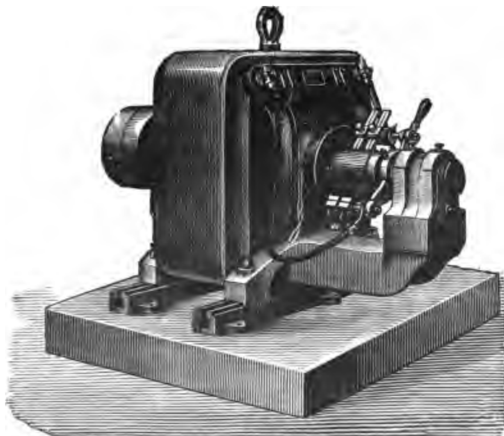


Fig. 147.

Was die Eigentümlichkeiten der Lahmeyer-Maschine anbelangt, so ist darüber folgendes zu bemerken: Die kurzen dicken Magnetschenkel ragen in wagerechter Richtung aus zwei senkrecht stehenden Platten hervor, die wiederum in einem einzigen Gußstück, durch zwei teilweis bogenförmige Platten, in wagerechter Richtung verbunden sind. Die Enden der bogenförmigen, über und unter dem Trommelanker befindlichen Plattenteile nehmen hierbei zu dem benachbarten Magnetschenkel entgegengesetzte Polarität an; die Pfeile der im Eisen gezeichneten punktierten Linien geben

die Richtung der Kraftlinien (des magnetischen Kraftflusses) unter der Voraussetzung an, daß der rechts befindliche Magnetschenkel dem Nordpol entspricht. Diese Kraftlinien müssen durch die Drahtbewickelung des Trommelankers gehen, bevor sie sich in den bogenförmigen Gestellteilen verzweigen. Der Anker besteht, wie dies bei den Ankern der Dynamomaschinen im allgemeinen üblich ist, aus dünnen Eisenblechscheiben, die mittels Papierzwischenlage von einander isoliert sind und durch isolierte Bolzen zusammengehalten werden. Nachdem so zehn oder fünfzehn Scheiben auf die Ankerwelle aufgesetzt worden sind, werden jedesmal zwei Scheiben ausgelassen, so daß im Ankereisen Kanäle für den Luftzug gebildet werden. Da der Raum um die Welle herum frei bleibt und die die Scheiben zwischen sich fassenden Kopfplatten durch Öffnungen der Luft Zutritt gewähren, so entsteht bei der Rotation des Ankers durch denselben hindurch ein sehr kräftiger Luftstrom, der den Anker kühl erhält.

In noch vollkommenerer Weise hat Eickenmeyer in New York dasselbe Ziel zu erreichen gesucht. Die Form seiner Maschine ist der Lahmeyerschen ähnlich, aber die Feldmagnete sind aus schmiedeeisernen Blechscheiben gebildet; ferner sind auch die zur Rückleitung der magnetischen Kraftlinien dienenden Kopf- und Rückenplatten, die durch Schraubenbolzen mit den Magneten verbunden sind, aus Schmiedeeisen hergestellt. Hierdurch wird allerdings der Wirkungsgrad der Maschine, gegenüber den mit gußeisernen Magneten und Gestell versehenen guten Dynamos, noch um etwa 3 bis 4 Prozent erhöht, dafür aber auch die Herstellung unverhältnismäßig verteuert.

Die zweipolige Trommelmaschine der Eßlinger Maschinenfabrik (Fig. 148) hat mit Bezug auf die Anordnung des Magnetfeldes als eine Umkehrung der Lahmeyer-Maschine zu gelten. Die Induktion des Trommelankers kann auch hier bei normalem Verlauf der Kraftlinien nur an den Stellen stattfinden, wo die Kraftlinien normal in das Ankereisen eintreten. Dieselbe Form kommt auch

bei den Maschinen von Mather & Platt in Manchester und in der Maschinenfabrik Oerlikon, zu Oerlikon, Schweiz, in Anwendung. Es ist hierbei dasselbe Ziel angestrebt wie bei der Lahmeyer-Maschine und in der Hauptsache wohl

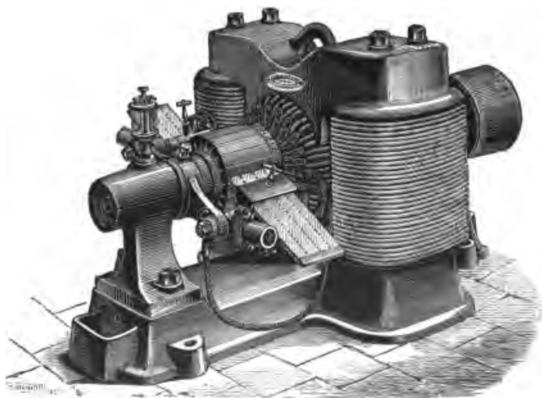


Fig. 148.

auch erreicht worden. Überhaupt besteht in den Wirkungsgraden der heutigen guten Dynamomaschinen, gleichviel welcher Type dieselben angehören, kaum ein bemerkenswerter praktischer Unterschied.

146. Die Innenpolmaschine. — Die in Fig. 145 skizzierte Innenpolmaschine von Siemens & Halske ist besonders mit Rücksicht auf geringe Umdrehungszahl gebaut, so daß dieselbe sich mit nicht zu schnell laufenden Dampfmaschinen direkt verkuppeln läßt. Die genannte Firma hat Maschinen dieser Art bis zu 3 m Durchmesser des Ankerringes für eine Betriebskraft von 500 Pferdestärken und eine Leistung bis zu 300 000 Volt-Ampère gebaut. Die größeren Maschinen sind mit sechs bis acht Magnetpolen im Innern des Ankerringes versehen, während die kleineren Maschinen nur vier

Magnetpole haben. Der Anker ist aus Segmenten von dünnem Eisenblech mit Papierzwischenlagen zusammengebaut. Der äußere Umfang ist mit breiten, auf die hohe Kante gestellten, von einander isolierten Kupferstäben belegt, deren äußerer blank abgedrehter Umfang den Kommutator bildet, auf dem die Bürsten schleifen. Zwischen je zwei benachbarte Magnetpole kommt immer eine Reihe nebeneinandergestellter Bürsten zu liegen. Die Kupferstäbe des Ankers sind mittels übersponnener und mit den Enden der Stäbe weich verlöteter Kupferdrähte in der Anordnung der Bewickelung des Gramme-Ringes verbunden. Die Magnetschenkel sitzen auf einer entsprechend polygon geformten gußeisernen Nabe und sind mit ihren schmiedeisernen, kreissegmentförmigen Köpfen mittels Schraubenbolzen darauf befestigt. Die Benutzung des Ringumfanges als Kommutator ist sehr zweckmäßig, denn infolge der geringen Potentialdifferenz zwischen den einzelnen Stäben des großen Ringumfanges ist die Funkenbildung an den Bürsten so gut wie vollständig vermieden. Es zeichnen sich diese Maschinen ebenfalls durch einen hohen elektrischen Wirkungsgrad aus und es sind dieselben infolge ihrer Ausführung für große Leistungen, besonders für Zentralen, geeignet.

Fig. 149 zeigt eine solche von der Firma Siemens & Halske gebaute „Innenpolmaschine“ in ihrer Gesamtansicht; derartige Maschinen sind in den Berliner Elektrizitätswerken in Betrieb; dieselben sind mit den Dampfmaschinen direkt gekuppelt, d. h. der große Ankerring von 2.5 m Durchmesser sitzt auf der Welle der 500pferdigen Dampfmaschine. Die Gesamtleistung einer solchen Dynamomaschine beträgt 17 700 000 Volt-Ampères oder Watts.

Fig. 150 S. 306 zeigt eine kleinere Type der Innenpolmaschine für 150 Volt Spannung und 35 000 Volt-Ampères Leistung bei 330 Umdrehungen pro Minute. Der Durchmesser des Magnetkreuzes beträgt 800 mm; der äußere Durchmesser des Ankerringes 930 mm.

147. Die Scheibenanker-Maschinen. — Die Wirkungsweise beruht auf dem folgenden Prinzip:

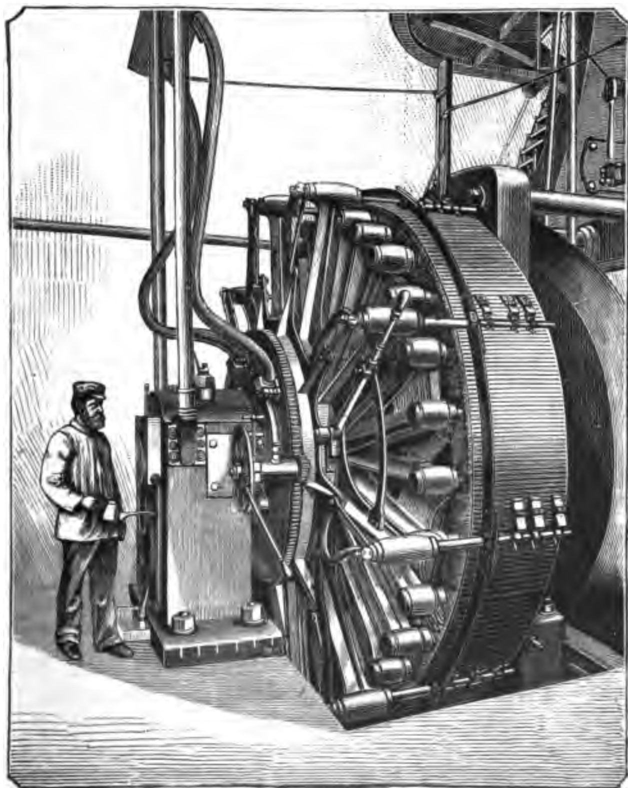


Fig. 149.

Wird eine Drahtspule, deren Windungsfläche senkrecht zur Achse eines Magnets liegt, durch das Magnetfeld

derartig bewegt, daß die Spulenfläche die Magnetachse winkelrecht durchschneidet, so werden in der Spule elektromotorische Kräfte induziert, deren Richtung in dem Moment wechselt, in welchem die Mitte der Spulenfläche durch die Magnet-

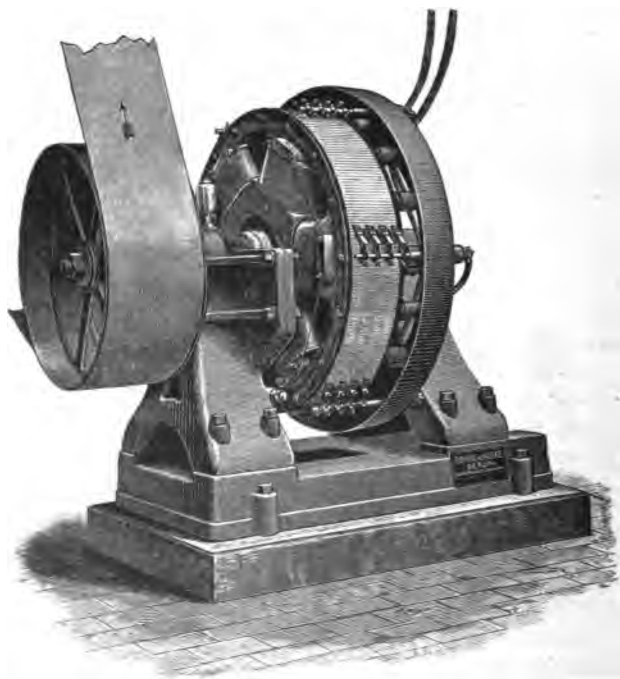


Fig. 150.

achse hindurchgeht, d. h. die elektromotorische Kraft ist in diesem Moment gleich Null. Wird also, mit Bezug auf Fig. 151, vor den entgegengesetzten Magnetpolen N S ein leitend verbundenes Spulenpaar a b um die

zur Figurenfläche senkrechte Achse c gedreht, so ändert sich die Richtung der in den beiden Spulen a und b induzierten elektromotorischen Kraft in dem Augenblicke, in welchem der Verbindungsdraht der Spulen mit der Magnetachse NS zusammenfällt. Wird die Verbindung der Spulen an irgend einer Stelle unterbrochen und werden die freien Spulenenden mit zwei unter sich und von der Drehachse isolierten Metallringen vereinigt, auf denen je eine mit dem äußeren Stromkreis verbundene Bürste schleift, so erhält man, wie bei jeder Induktionsmaschine (mit Ausnahme der für den praktischen Betrieb ungeeigneten Unipolarmaschinen), Wechselströme, d. h. Ströme von wechselnder Richtung erzeugt, welche sich durch einen zweiteiligen Kommutator als ein gleich gerichteter Strom nach dem äußeren Stromkreis abführen lassen.

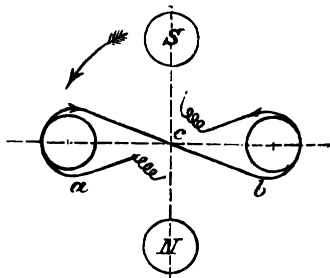


Fig. 151.

Nach diesem Prinzip ist seit der ersten, 1832 von Pixii erfundenen Induktionsmaschine eine Reihe von Induktionsmaschinen, teils für Gleichstrom, teils für Wechselstrom, gebaut worden.

Die erste derartige Maschine wurde von Alfred Niaudet 1872 für Gleichstrom konstruiert, indem derselbe das Prinzip der Pixiischen Maschine mit dem der Grammeschen vereinigte*). Die eiserne Scheibe ist mit zwölf im Kreise aufgesetzten Spulen versehen, die auf Eisenkerne aufgesteckt sind (Fig. 152 S. 308). Diese Spulen sind ähnlich wie die Spulen des Gramme-Ringes hintereinandergeschaltet, so daß ihre

---

*) Alfred Niaudet, „Machines électriques". Paris 1881. S. 30.

Bewickelung einen fortlaufenden Draht bildet und die in diesem Drahte beim Vorüberdrehen an den Magnetpolen N S erregten elektromotorischen Kräfte sich summieren. Die zwölf Verbindungsstellen der Drahtspulen sind, wie bei der Gramme-Maschine, mit den zwölf Abteilungen des auf der Scheibenwelle sitzenden Kommutators vereinigt. Wenn die Bürsten b b an den beiden entgegengesetzten Stellen des Kommutators angelegt werden, die durch die neutrale Linie N S bezeichnet sind, so liefern dieselben einen Strom von gleichbleibender Richtung in den äußeren Stromkreis. Die Wirkung dieser Maschine war im Vergleich zur Gramme-Maschine sehr schwach.

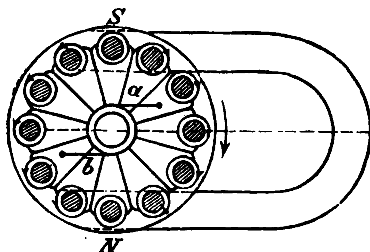


Fig. 152.

Eine ähnliche Anordnung wurde von Lontin gewählt, jedoch mit dem Unterschiede, daß die Spulen nicht parallel zur Scheibenachse, sondern radial auf deren Umfang aufgesetzt waren.

Ferner ist die von dem Amerikaner Wallace-Farmer konstruierte Maschine der Niaudetschen im Prinzip ähnlich.

Noch zu erwähnen ist die 1881 von Hefner-Alteneck für die Firma Siemens & Halske konstruierte Scheibenmaschine, deren Anordnung so getroffen war, daß in der ganzen Maschine kein magnetischer Polwechsel stattfinden konnte und damit auch die in Form von Wärme sich äußernden Kraftverluste wegfielen. Die Maschine hatte mit den sonst gebräuchlichen zweipoligen dynamoelektrischen Maschinen das gemeinsam, daß der elektrische Strom in den beiden Hälften zweier parallel geschalteten Zweige entsteht. Während aber diese beiden Stromzweige in jenen

Maschinen in ihrer absoluten Lage fest stehen bleiben, rotierten dieselben bei der Hefner-Alteneckschen Maschine. Trotzdem blieben aber, vermöge der eigentümlichen Zahl und Verbindung der Kommutatorteile, die Enden der beiden Zweige stets mit den ruhenden Kommutatorbürsten in entsprechender Verbindung. Die drei zuletzt besprochenen Maschinen haben nur noch historisches Interesse.

Schließlich ist noch die von Ferranti und William Thomson konstruierte Gleichstrommaschine zu erwähen, die aber auch als Wechselstrommaschine benutzt wird, in welcher Form dieselbe hauptsächlich benutzt wird, weshalb deren Konstruktion bei den Wechselstrommaschinen zu besprechen ist. Überhaupt ist darauf hinzuweisen, daß alle Induktionsmaschinen eigentlich Wechselstrommaschinen sind, da ohne Stromwechsel keine Induktion möglich ist. Nur durch geeignete Kommutatoren wird der Wechselstrom als Gleichstrom in den äußeren Stromkreis, in welchem denn auch die Magnetschenkel liegen, übergeführt.

Als Scheibenmaschine neuester und eigentümlicher Konstruktion hat die von Fritsche, in Firma Fritsche & Pischon (Berlin) zu gelten.

Diese Maschine ist mit einem sogenannten Radanker versehen, der weder einen Kern noch Drahtbewickelung hat. Es besteht dieser Anker aus einem System von schmiedeeisernen, gitterartig angeordneten Stäben, die, soweit sie nicht in der Nabe befestigt sind, ganz frei liegen und nur durch Luftzwischenräume von einander isoliert sind. Es wird auf diese Weise ein Rad mit Speichen gebildet, auf dessen Umfang die Bürsten schleifen. Durch die Vermeidung übersponnener Bewickelungsdrähte wird die Dauerhaftigkeit dieses Ankers wesentlich erhöht. Bezüglich der Anordnung des Magnetfeldes ist zu bemerken, daß dasselbe sich innerhalb des Ankers befindet und daher diese Maschine zu den Innenpolmaschinen gehört. Es sind immer zwei gleichnamige Pole einqnder gegenüber angeordnet, so daß der Übertritt der magnetischen Molekularströme von Pol zu Pol durch den

eisernen Anker vermittelt wird. Die Maschine läuft mit geringer Tourenzahl und es beträgt die mittlere Umfangsgeschwindigkeit dieses Ankers nur 8 bis 9 m in der Minute, so daß diese Maschine für direkte Kuppelung mit dem Betriebsmotor sehr wohl geeignet ist.

148. **Die Unipolarmaschinen.** — Unipolarmaschinen sind Induktionsmaschinen, bei denen ein begrenzter Stromleiter durch ein homogenes magnetisches Feld bewegt wird. Es kann auf diese Weise ein Gleichstrom ohne Kommutator erhalten werden, jedoch haben diese Maschinen, ihres geringen Wirkungsgrades wegen, noch keine praktische Bedeutung erlangt.

Die erste Unipolarmaschine wurde von Faraday mittels einer zwischen den entgegengesetzten Polen eines Hufeisenmagnets rotierenden Kupferscheibe hergestellt. Es entstehen auf diese Weise nach den Gesetzen der Induktion in der Scheibe radialgerichtete elektromotorische Kräfte. Zur Abnahme des so erzeugten Stromes dienen zwei Metallfedern oder Drahtbürsten, von denen die eine auf dem Umfang der Scheibe, die andere auf der Scheibenachse schleift.

In einer andern Klasse von Unipolarmaschinen, das heißt von Gleichstrommaschinen ohne Kommutator, werden die aus dem einen Pole oder aus den beiden Polen eines Stabmagnetes achsial und seitlich austretenden Kraftlinien zur Induktion der Ankerdrähte benutzt. Der Anker wird hierbei aus einem rechtwinklig gebogenen Drahte gebildet, der mit einem kurzen Schenkel rechtwinklig auf der Drehachse sitzt, während der lange Schenkel parallel zur Drehachse liegt. Dieser Draht wird praktisch auch durch einen über den Stabmagnet geschobenen und an der einen Seite geschlossenen Kupfercylinder ersetzt, auf dessen Umfang Federn zur Abnahme des Stromes schleifen. Die Wirkung wird hierdurch zwar beträchtlich verstärkt, jedoch entstehen auch bei dieser Anordnung in der Kupfermasse Nebenströme, die eine befriedigende Leistung der Maschine verhindern.

Zu dieser **Klasse von Unipolar**maschinen gehört vor allen **die von** Werner Siemens konstruierte, die eine Potentialdifferenz bis zu 5 Volt entwickeln ließ, jedoch rotiert hierbei der aus Segmenten gebildete kupferne Anker innerhalb des röhrenförmigen Magnets. In ihrer Anordnung hat diese Maschine (Fig. 153) zwei röhrenförmige kupferne Anker b,

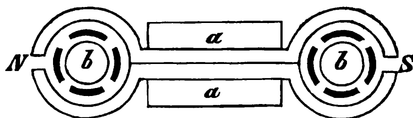


Fig. 153.

die je in vier Segmente zerlegt sind und isoliert auf einer Achse sitzen. Der mit den Polen N und S versehene Elektromagnet, der durch die Spule **a** erregt wird, besteht aus einer Reihe neben einander liegender Lamellen. Die Spule **a** wird im Nebenschluß zum Stromkreise erregt.

Trotz ihrer ausgezeichneten Durcharbeitung und sinnreichen Anordnung hat auch diese Unipolarmaschine keine praktische Bedeutung erlangt, weil ihre Konstruktion kostspielig und ihre Wirkung verhältnismäßig sehr gering ist.

149. **Die Behandlung, die Schaltungsweise und der Betrieb der Gleichstrommaschinen.** — Ein ziemlich heikler Teil der Gleichstrommaschinen ist der Kommutator, der sich leicht abnutzt, unrund wird, zu Funkensprühen Anlaß giebt und in dessen Nähe die Drähte leicht abbrechen. Sehr wichtig ist ein festes Aufsitzen des Kommutators auf der Welle und ein vorsichtiges Behandeln der Drahtenden bei deren Verbindung mit dem Kommutator. Das Funkensprühen am Kommutator kann aus verschiedenen Ursachen entstehen:

1. durch Unrundwerden des Kommutators;
2. durch falsche Stellung der Bürsten;
3. durch einen Drahtbruch in der Ankerbewickelung;
4. durch Kurzschluß in den Spulen der Feldmagnete;

5. durch Kurzschluß in der äußern Leitung;
6. durch Überlastung der Maschine.

Um die Abnutzung des Kommutators und hauptsächlich dessen Unrundwerden zu verhüten, ist derselbe aus einem geeigneten Material herzustellen. Sehr gut haben sich die Kommutatoren aus weicher Bronze oder Kupfer mit Glimmerisolation bewährt; jedoch ist auch Preßspan ein ausreichender Isolator. Die Abnutzung des Kommutators ist auch von der Verbindung der einzelnen Kommutatorstreifen mit den Ankerspulen abhängig. Wird eine Ankerspule durch die Bürsten kurz geschlossen, wenn sie schon eine beträchtliche Induktion erleidet, so nutzen sich die betreffenden Kommutatorstreifen merklich stärker ab, als wenn die Ankerspule bei Eintritt des Kurzschlusses sich gerade in der neutralen Zone befindet.

Die Bürstenstellung ist so einzurichten, daß das geringste Funkengeben stattfindet, und bei starker Belastung der Maschine müssen die Bürsten entsprechend über die normale Stellung hinaus auf Voreilen eingestellt werden, weil die neutrale Zone eine entsprechende Verschiebung in diesem Falle erleidet.

Bei Drahtbruch im Anker treten am Kommutator förmliche Spitzflammen auf, die leicht zu bemerken sind. Es muß alsdann die Maschine sofort angehalten werden.

Der Kurzschluß in den Magnetspulen ist dagegen schwer zu erkennen und kann nur mittels Meßinstrumente durch Nachweis der Abnahme des Leistungswiderstandes festgestellt werden.

Eine Überlastung der Maschine ist gänzlich zu vermeiden.

Was die Schaltungsweise der Dynamomaschinen anbelangt, so bezieht sich diese auf die Verbindung der Magnetschenkel mit dem Anker und dem äußern Stromkreise, indem ein Teil der im Anker erzeugten elektrischen Energie zur Magnetisierung der Schenkel zu verwenden ist. Zu diesem Zweck sind drei verschiedene Schaltungsweisen (Fig. 154) im Gebrauch.

Die älteste und einfachste ist die Reihen= oder Serienschaltung, auch Hintereinanderschaltung (Fig. 154 A), wobei der gesamte von den Kommutatorbürsten abgeführte Strom der Maschine durch die Magnetbewickelung hindurch in den äußern Stromkreis gesendet wird. Diese Art der Schaltung oder Maschinenbewickelung ist meist dann in Anwendung gebracht, wenn von einer Maschine eine Reihe von Bogenlampen gespeist werden, indem hierzu die Stromstärke konstant zu halten ist, die Spannung aber, je nach der wechselnden Anzahl der betriebenen Lampen, verändert wird.

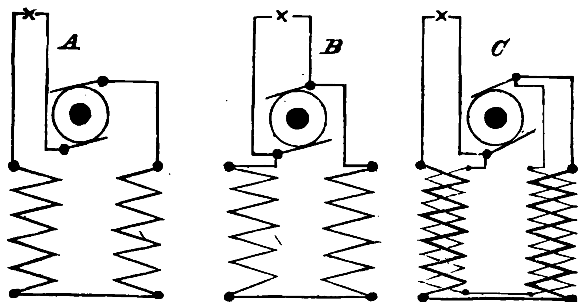


Fig. 154.

Die zweite Art von Schaltung (Fig. 154 B) wurde zuerst von Wheatstone benutzt. Es ist dies die sogenannte Nebenschlußschaltung, wobei der vom Anker ausgehende, in die Bürsten aufgenommene Strom in zwei ungleiche Teile geschieden wird. Der kleinere Teil davon geht in die Magnetbewickelung und von da in den äußern Stromkreis über, wo beide Stromteile sich wieder vereinigen. Es wird diese Stromteilung dadurch erreicht, daß die Magnetschenkel mit dünnem Drahte von bedeutend höherem Widerstande, als im äußern Stromkreise herrscht, bewickelt sind. Die auf

diese Weise eingerichteten Dynamomaschinen werden als Nebenschlußmaschinen bezeichnet und sind für einen Betrieb geeignet, wo innerhalb gewisser Grenzen eine Selbstregulierung der Maschine auf konstante Spannung verlangt wird.

Was endlich die dritte Schaltungsweise (Fig. 154 C) anbelangt, so besteht diese aus einer Verbindung der Reihen- und Nebenschlußschaltung, zu welchem Zwecke die Magnetschenkel mit einer Bewickelung aus dickem Draht und einer Bewickelung aus dünnem Draht versehen sind. Es hat diese Schaltungsweise den Zweck, die Klemmenspannung der Maschine bei konstanter Umlaufsgeschwindigkeit des Ankers innerhalb gewisser Grenzen, unabhängig vom äußern Widerstande, das heißt von der Belastung der Maschine, konstant zu erhalten. Diese Bewickelungsart der Dynamomaschinen wurde zuerst von Brush ausgeführt; die Firma Siemens & Halske hat dieselbe aber zuerst zu dem erwähnten Zwecke benutzt. Die Maschinen mit dieser sogenannten gemischten Bewickelung werden als Gleichspannungsmaschinen oder auch als Compounddynamos bezeichnet; sie werden hauptsächlich zum Betriebe parallel geschalteter Glühlampen benutzt, wobei aber auch Bogenlampen parallel mit eingeschaltet werden können. Die Klemmenspannung der Nebenschlußmaschinen und Compoundmaschinen läßt sich durch Einschaltung von künstlichen Widerständen in die Nebenschlußbewickelung der Schenkel bequem regulieren. Hierüber wird weiteres im Kapitel über Beleuchtungsanlagen folgen. Die Nebenschlußmaschinen werden besonders zum Laden von Akkumulatoren benutzt, indem sie bei etwa eintretender Umkehrung des Stromes bei zufälligem Nachlassen der Maschinengeschwindigkeit sofort stromlos werden, indem die Ankerbewickelung den äußern Stromkreis kurz schließt und somit keinen Strom in die Magnetschenkel eintreten läßt.

Einunddreißigstes Kapitel.

Theorie und Berechnung der Gleichstrommaschinen.

150. Allgemeines Gesetz der Wirkungsweise. — Die Gleichstrommaschinen liefern bei der Bewegung durch eine äußere Kraft einen elektrischen Strom und können umgekehrt durch Einführung eines elektrischen Stromes als Motoren benutzt werden.

Bei einer solchen Maschine, deren Strom absolut gleichförmig ist, besteht unter sonst gleichen Verhältnissen Proportionalität zwischen der elektromotorischen Induktionskraft E und der Umdrehungsgeschwindigkeit, das heißt: die elektromotorische Kraft ist proportional der Umdrehungszahl n pro Sekunde und einer Funktion $\varphi(I)$ der Stromstärke, wobei die Form dieser Funktion von der Konstruktion der Maschine abhängig ist, so daß man also setzen kann

$$E = n\,\varphi(I).$$

Benutzt man die Maschine als Motor, indem man sie durch eine konstante elektromotorische Kraft E_0 in Bewegung setzt, so ist die Stromstärke in einem Kreise, dessen Widerstand R ist, gegeben durch die Gleichung

$$I R = E_0 - E = E_0 - n\,\varphi(I).$$

Die während der Zeiteinheit verbrauchte Arbeit ist $W = E_0 I$. Bezeichnet man mit I_0 den Strom $\frac{E_0}{R}$, der zu einem in Ruhe befindlichen Motor gehören würde, so kann die ausgenutzte Arbeit dargestellt werden durch

$$U = E I = E_0 I - R I^2 = R I (I_0 - I)$$

und der Nutzeffekt durch

$$u = \frac{U}{W} = \frac{E}{E_0} = \frac{n\,\varphi(I)}{E_0}.$$

Da theoretisch die Nutzarbeit am größten und der Nutzeffekt gleich 0.50 ist, wenn $2\,I = I_0$ ist, so ist die entsprechende Geschwindigkeit des Motors

$$n = \frac{E_0}{2\,\varphi\left(\frac{E_0}{2\,R}\right)}.$$

Wenn die Maschine sich selbst überlassen wird und keinerlei Reibung vorhanden wäre, so wächst die Geschwindigkeit, bis der Strom Null ist; die elektromotorische Kraft der Maschine ist dann gleich derjenigen der Elektrizitätsquelle und der Nutzeffekt ist gleich Eins.

Wird die Maschine als Elektromotor benutzt, so kann der Strom nur unterhalten werden, wenn die aufgewendete Energie $E\,I$ größer ist als die Energie $R\,I$, die als Erneuerung des Stromkreises auftritt, oder wenigstens dieser Energie gleich ist; es muß also das Verhältnis bestehen

$$n\,\varphi\,(I) \geqq R\,I.$$

Soll die Maschine unter der Einwirkung eines sehr schwachen Stromes von selbst angehen, so muß sein

$$n\,\varphi\,(i) > i\,R.$$

Wenn die äußere Arbeit sich auf die Entwickelung von Wärme im Stromkreise beschränkt, so tritt für einen Strom I_0 Gleichgewicht ein, wenn ist

$$n\,\varphi\,(I_0) = I_0\,R.$$

Diese Gleichung liefert allgemein für I_0 einen endlichen Wert. Da die Stromstärke für eine bestimmte Geschwindigkeit wächst, so muß das Verhältnis $I : \varphi\,(I)$ im allgemeinen mit der Stromstärke wachsen*).

151. **Berechnung des Ankers.** — Im allgemeinen ist es nicht schwer eine Dynamomaschine herzustellen, wenn man

*) Mascart u. Joubert, „Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus". Berlin 1888. Bd. II, S. 654.

nicht nach den Kosten fragt, das heißt, wenn man beliebig viel Material an Eisen und Kupfer verwendet. Man kann dann leicht eine Maschine von starker Leistung und mit Bezug auf die verwendete Betriebskraft von hohem Wirkungsgrade erhalten. Spart man dagegen übermäßig an Material, so erhält man wohl eine in den Herstellungskosten billigere Maschine, jedoch ist der Wirkungsgrad gering.

Es handelt sich also bei der Konstruktion einer solchen Maschine darum, die Einrichtung so zu treffen, daß das verwendete Material Kupfer und Eisen der verlangten Leistung entspricht und zur Erzielung eines guten Nutzeffektes gehörig ausgenutzt wird. Zur Herstellung einer guten Dynamomaschine ist die reine Theorie nicht ausreichend, sondern es müssen gewisse Erfahrungsresultate berücksichtigt und Versuche angestellt werden.

Aus der Tourenzahl des Ankers erhält man dessen Durchmesser, wenn man vorläufig eine Umdrehungsgeschwindigkeit innerhalb der zulässigen Grenzen 12 bis 15 m pro Sekunde für Trommelanker oder Ringanker feststellt. Für Flachring- und Scheibenanker kann man bis 20 m gehen. Ist D der Durchmesser des Ankers, so ist bei n Touren in der Minute die Umdrehungsgeschwindigkeit $\frac{\pi D n}{60}$. Nimmt man für diese Geschwindigkeit 15 m an, so

ist $D = \frac{15 \times 60}{\pi n} = \frac{286}{n}$ m.

Nachdem somit vorläufig der Ankerdurchmesser mit Rücksicht auf eine gewisse Tourenzahl bestimmt worden ist, hat man die Anzahl der Drahtwindungen für den Anker mit Bezug auf die verlangte Leistung der Maschine festzustellen. Hierbei sind gewisse Grundsätze maßgebend: Je weniger Windungen auf dem Anker sind, desto weniger wird die sogenannte Ankerreaktion auftreten, durch welche das Magnetfeld geschwächt wird, desto größer muß aber auch die Tourenzahl sein, um eine gewisse Klemmenspannung zu

erzielen. Bei wenig Drahtwindungen ist auch die Erwärmung des Ankerdrahtes und demzufolge der Verlust, der durch die Wärmeerzeugung bezw. der Erzeugung elektrischer Energie herbeigeführt wird, geringer und man kann Draht von geringerer Dicke verwenden. Dagegen wird durch die Verminderung der Ankerwindungen zur Erzielung einer gewissen Maschinenleistung die Verstärkung des Magnetfeldes nötig, so daß stärkere Feldmagnete anzuwenden sind, die mehr Eisen und Kupfer erfordern.

Maßgebend für die Windungszahl und den Drahtquerschnitt ist die Stromdichte, das heißt: die Anzahl von Ampères, die man pro Quadratmillimeter durch den Draht senden will. Man nimmt gewöhnlich 4 Ampères pro Quadratmillimeter an, jedoch sind hierbei mancherlei Rücksichten maßgebend, besonders aber ist dabei die mögliche Erwärmung des Ankers in das Auge zu fassen, die 60° C. nicht überschreiten soll.

Jedenfalls sind die Drahtwindungen so auf dem Anker anzubringen, daß der vorhandene Raum gut ausgenutzt wird; man nimmt deshalb auch häufig flachgewalzten Draht, zuweilen auch Kupferstäbe. Die Trommelanker werden jedoch meist mit rundem Draht bewickelt. Natürlich muß die Isolation des Drahtes eine hinreichende sein.

Wenn bei rundem Drahte D der äußere Durchmesser des Ankers und d der Durchmesser des Drahtes mit Einrechnung seiner Isolationshülle ist, so ist $D + d$ der Durchmesser zwischen den Drahtquerschnittmittelpunkten. Die Länge des Umfanges ist dann $\pi(D + d)$ und dieser Umfang geteilt durch den Durchmesser bezw. die Dicke des isolierten Drahtes ergiebt die Anzahl Z der nebeneinander auf den Anker zu wickelnden Drähte nach der Gleichung

$$Z = \frac{\pi(D + d)}{d}.$$

Bei Maschinen mit schwacher Leistung kann man mehrere Drahtlagen über einander winden, besonders dann, wenn

die Maschine mit hoher Spannung und demzufolge mit geringer Stromstärke arbeitet. Bei Maschinen mit stärkerer Leistung und also größerer Stromstärke soll dagegen der Anker nur eine Drahtlage erhalten.

Die Drahtdicke und die Zahl der Drahtwindungen des Ankers sind maßgebend für die Stärke des magnetischen Feldes.

Ist zum Beispiel die Maschine mit einem Ringanker versehen, der in einem zweipoligen Magnetfelde sich befindet, so wird der Eisenkern des Ringes von der die magnetische Stromstärke oder den magnetischen Kraftfluß darstellenden Kraftlinienzahl N durchdrungen, welche von dem einen Magnetpole des Feldes nach dem anderen Pole geht; die Kraftlinienzahl verteilt sich hierbei gleichmäßig auf die beiden Ringhälften in zwei Strömen. Jede Drahtwindung des Ringankers geht bei jeder Umdrehung des Ankers zweimal durch die neutrale Zone des Magnetfeldes, wo die Drahtwindungen von der Hälfte der Kraftlinienzahl oder des magnetischen Kraftstromes durchdrungen werden. Ferner gehen natürlich auch die Drahtwindungen zweimal durch die Polmitten, wo die auf die Drahtwindungen einwirkende Kraftlinienzal Null ist. Bezeichnet man mit t die Zeitdauer einer Ankerumdrehung, so ist die in jeder Drahtwindung des Ankers entwickelte mittlere elektromotorische Kraft

$$\frac{4 \times \frac{N}{2}}{t} = \frac{2\,N}{t}.$$

Ist der Ringanker mit Z Drahtwindungen versehen, so sind der magnetischen Induktion gegenüber immer $\frac{Z}{2}$ Windungen in Hintereinanderschaltung bei der Entwickelung der elektromotorischen Kraft beteiligt und es wird daher die bei jeder Ankerumdrehung entwickelte elektromotorische Gesamtkraft durch

$$\frac{Z\,N}{t}$$

ausgedrückt. Bezeichnet man endlich noch mit $\frac{n}{60} = n'$ die Umdrehungszahl des Ankers in der Sekunde, so ist die von der Maschine entwickelte mittlere elektromotorische Kraft oder Klemmenspannung in Volts gegeben durch

$$E_m = \frac{n'\,Z\,N}{60} \cdot 10^{-8} = \frac{n'\,Z\,N}{60\,.\,10^8}.$$

Um die mit einem Trommelanker zu erhaltende mittlere elektromotorische Kraft oder Klemmenspannung zu bestimmen, ist mit N die den Ankerkern durchdringende Gesamtzahl der magnetischen Kraftlinien und mit Z die Anzahl der auf dem Trommelumfange nebeneinander liegenden einzelnen Drähte zu bezeichnen. Mit Rücksicht auf diese Bedeutung von N und Z gilt dann auch für den Trommelanker die vorhergehende Formel.

Wird das magnetische Feld nicht bloß durch zwei Pole, sondern durch p Pole gebildet, so ist zu setzen

$$E_m = \frac{p\,n'\,Z\,N}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volts.}$$

Die gesamte elektromotorische Kraft, die bei voller Belastung der Maschine entwickelt werden soll, ist durch die geeignete Verstärkung des Magnetfeldes um den durch den Ankerwiderstand hervorgerufenen Verlust zu vergrößern.

Bezüglich der für die spezifische Induktion des Ankers benötigte Kraftlinienzahl kann man 12000 bis 18000 pro Quadratcentimeter Querschnitt des eisernen Ankerkernes annehmen. Da bei dem Grammering der aus weichen Eisendrähten gebildete Anker im Querschnitt nicht volles Eisen enthält, so ist darauf Rücksicht zu nehmen. Bei dem aus

Eisenscheiben zusammengesetzten Kern des Trommelankers rechnet man etwa 80 bis 85 Proz. auf das Eisenvolumen.

Für die Länge des Trommelankers sind gewisse Bedingungen maßgebend, jedoch hat man sich dabei nach der Maschinentype zu richten. Man kann annehmen, daß die Ankerlänge das zwei- bis dreifache des Durchmessers beträgt.

Der Zwischenraum zwischen den Feldmagnetpolen und dem Eisenkern des Ankers ist möglichst zu verringern, weshalb man möglichst zu vermeiden hat, daß mehrere Drahtlagen übereinander kommen; auch legt man wohl mit Rücksicht darauf den Ankerdraht in Vertiefungen des Ankerumfanges ein. Mit Bezug hierauf ist zu berücksichtigen, daß die beste Materialausnutzung erreicht wird, wenn die Intensität des Magnetfeldes im Luftzwischenraum 2500 bis 4000 C. G. S.-Einheiten beträgt; bei zweipoligen Ringmaschinen gilt dies mit Bezug auf die halbe äußere Ankeroberfläche. Man kann annehmen, daß im Luftraume etwa 1/4 bis 1/3 der im Feldmagnete erregten Kraftlinien zerstreut wird, so daß für 100 durch den Anker gehenden Kraftlinien etwa 125 bis 133 Kraftlinien im Feldmagnet zu erregen sind.

Infolge des Widerstandes im Ankerdraht und im Eisenkern des Ankers gegenüber den hindurchgehenden Energieströmungen tritt eine Erwärmung des Ankers ein. Die Erwärmung des Ankerdrahtes läßt sich nach der Jouleschen Formel

$$E\,I = I^2 R$$

in Watts berechnen. Kennt man die Zahl der als Wärme auftretenden Watts, so läßt sich nach einer von Essen aufgestellten Formel

$$C^\circ = \frac{225\,W}{S}$$

die Temperaturerhöhung des Ankers in Centigraden angenähert bestimmen, wenn W die Anzahl der Watts und S die Abkühlungsfläche des Ankers in Quadratcentimetern bezeichnet.

Hat man Ankerdurchmesser und Ankerlänge vorläufig bestimmt, so läßt sich daraus die Länge einer Drahtwindung und mit Rücksicht auf den Drahtdurchmesser auch die Anzahl der Drahtwindungen bemessen, die auf dem Anker Platz finden.

Bezeichnet man mit z_a die Zahl der hintereinandergeschalteten Windungen und ist q der Querschnitt des Drahtes in Quadratmillimetern, ferner l die Länge einer Drahtwindung in Metern, so ist der Ankerwiderstand in Ohms

$$r_a = c \frac{z_a l}{2q},$$

wobei c den spez. Widerstand des Kupfers bezeichnet, welches mit dem Steigen der Temperatur sich vermindert. Ist I der durch die Ankerwindungen gehende Strom in Ampères, so ist der Verlust an elektromotorischer Kraft in Volts

$$I r_a = c \frac{z_a I l}{2q}.$$

Der Koeffizient c wird für Kupferdraht bei gewöhnlicher Temperatur gleich 0.0178, mit Rücksicht auf die höhere Temperatur, welche der Ankerdraht im Betrieb annimmt, aber gleich 0.02 gesetzt. Statt dessen führt man wohl auch das Leitungsvermögen in die Formeln ein und setzt dann $\frac{1}{c} = 50$.

Setzt man diesen Wert in der obigen Gleichung ein und für die Stromstärke I in Ampères A, für die Gesamtlänge des Bewickelungsdrahtes $z_a l$ in Meter M, so daß also AM die Zahl der Meter-Ampères bezeichnet, so erhält man für die elektromotorische Kraft $E = I r_a$ die Gleichung

$$E = \frac{AM}{50 q} \text{ Volts.}$$

Man hat dadurch den Verlust an elektromotorischer Kraft im Anker bestimmt.

Mit Bezug auf diesen Verlust hat man die Zahl der Ampèrewindungen bei Ringankern um 25 bis 30 Prozent und bei Trommelankern um 12 bis 15 Prozent über die theoretisch berechnete Zahl zu vermehren.

152. **Berechnung des Magnetfeldes.** — Das Verhältnis der im Feldmagnet erzeugten Kraftlinienzahl z_m zu der durch den Anker gehenden Kraftlinienzahl z_a, das ist z_m/z_a, wird gewöhnlich mit v bezeichnet. Da infolge des Luftzwischenraumes, der den Ankerkern von der Polfläche des Feldmagnets trennt, etwa ein Drittel bis ein Viertel der magnetischen Induktion des Feldmagnets für die Wirkung auf den Anker verloren geht, so ist v gleich 1.25 bis 1.33 zu setzen. Hat man somit diesen Wert vorläufig mit Rücksicht auf praktische Erfahrungen nach dem angegebenen Verhältnis festgestellt, so ist danach der Querschnitt des magnetischen Stromkreises zu berechnen.

Jenachdem Schmiede- oder Gußeisen zu dem Feldmagnet verwendet wird, ist die Zahl der pro Quadratcentimeter Querschnitt des magnetischen Stromkreises anzunehmende Kraftlinienzahl zu bestimmen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Bewickelung der Magnetschenkel um so schlechter ausgenutzt wird, je mehr man die Magnetisierung durch Vermehrung der Ampèrewindungszahl der Grenze der magnetischen Sättigung zutreibt. Ökonomisch ist es, verhältnismäßig viel Eisen und wenig Kupfer zu verwenden und sich unterhalb der Grenze der magnetischen Sättigung zu halten, indem man für Schmiedeeisen die magnetische Induktion nicht über 15000 Kraftlinien und für Gußeisen nicht über 8000 Kraftlinien pro Quadratcentimeter treibt.

Wie man sich von dem Grade der Sättigung der Feldmagnete ein Bild verschaffen kann, werden wir später sehen.

Da die Erwärmung der Magnetschenkel im allgemeinen etwas geringer ist, als die Erwärmung des Ankers, so kann

man den Koeffizienten des Leitungsvermögens zu 52 bis 53 annehmen.

Man hat angenommen, daß für die Schenkel eine Abkühlungsoberfläche von 10 bis 15 qcm pro Watt ausreichend ist und daß die Stromdichte im Bewickelungsdrahte 2 Ampères pro qmm nicht überschreiten dürfe.

Nach Hopkinson ist die Berechnung der Ampèrewindungen der Schenkel in der folgenden Weise auszuführen:

Ist z die Anzahl der Drahtwindungen auf beiden Schenkeln zusammen und i die Stärke des Erregungsstromes, so ist

$$4\pi z i = \frac{N\lambda}{\mu s} + \frac{v N \lambda}{\mu s},$$

wobei λ die gesamte mittlere Länge des magnetischen Stromkreises in Metern, s den Querschnitt in Centimetern und μ den Koeffizienten der magnetischen Durchdringlichkeit, welche für Gußeisen etwa 70 bis 80 und für Schmiedeeisen 550 bis 650 zu setzen ist. N bezeichnet die durch den Querschnitt des magnetischen Stromkreises gehende Kraftlinienzahl und ist, nach der vorhergehenden Bemerkung, pro qcm für Gußeisen 8000, für Schmiedeeisen 15 000 zu setzen.

Um den Draht für die Schenkelbewickelung zu berechnen, sei q der Querschnitt des Drahtes in Quadratmillimetern, M dessen Gesamtlänge in Metern, A die Stromstärke in Ampères und E die elektromotorische Kraft. Es gilt dann mit Bezug auf die Zahl der Meter-Ampères AM die Gleichung

$$q = \frac{AM}{50E}.$$

Diese Formel giebt also den Querschnitt q in Quadratmillimetern des Kupferdrahtes von L Meter Länge, in welchem eine elektromotorische Kraft einen Strom von i Ampères erzeugt. Die Zahl der Ampères ist also von der Zahl der Windungen abhängig, denn wenn man die Zahl der Windungen vermehrt, wird der Widerstand vergrößert

und dadurch die Zahl der Ampères in gleichem Verhältnis vermindert.

Im Vorhergehenden wurde bei der Berechnung der Querschnitte des magnetischen Stromkreises, sowie der Bewickelung des Ankers und der Magnetschenkel keine Rücksicht auf die bei dem Betriebe der belasteten Maschine nötigen Einstellung der Bürsten auf Voreilen und auf die Ankerreaktion genommen, sondern die Maschine im Leerlauf betrachtet. Während des Leerlaufens stehen die Bürsten in senkrechter Richtung zur Verbindungslinie der Magnetpole und die Ankerbewickelung wird nur von dem zur Magnetisierung der Schenkel nötigen Strome durchlaufen, so daß der Anker keinen bemerkbaren Einfluß auf das Feld ausübt. Man hat aber zu berücksichtigen, daß bei der Belastung der Maschine die Bürsten auf möglichst funkenfreien Gang einzustellen sind und daß der Anker einen merklichen Einfluß auf das Feld ausübt. Mit Rücksicht hierauf ist die Zahl der Ampèrewindungen der Schenkel um etwa 30 Prozent zu vergrößern und die früher aufgestellte Gleichung

$$q = \frac{A\,M}{50\,E}.$$

Der übersponnene isolierte Draht ist etwa um 0.6 mm dicker als der nackte Draht. Man kann nun berechnen, wieviel gegenüberliegende Windungen für jede Spule Platz haben und wieviel Drahtlagen zu nehmen sind. Man erhält so die Windungszahl und folglich die Gesamtlänge des Drahtes in Metern. Man kann also auch den Widerstand des Schenkeldrahtes berechnen und daraus auf die erzeugte Wärme, das ist auf den dadurch herbeigeführten Verlust an Watts schließen.

Die hiernach konstruierte Maschine ist nunmehr der Prüfung zu unterwerfen, welche lehren wird, ob die Maschine den Anforderungen entspricht oder ob vielleicht noch Abänderungen nötig sind.

153. Die Prüfung der Dynamomaschinen. — Um sich zu überzeugen, ob eine fertiggestellte Dynamomaschine in jeder Beziehung den Anforderungen des praktischen Betriebes entspricht, ist eine Reihe von Versuchen mit derselben anzustellen, deren Ergebnisse in graphischer Form die sogenannte „Charakteristik“ der Maschine liefern, aus der man sofort ersieht, welchen Veränderungen die elektromotorische Kraft oder die Stromstärke unterliegen, wenn Veränderungen im äußern Widerstande, in der Umdrehungszahl oder in der Magnetstärke vorgenommen werden.

Beispielsweise lasse man eine Serienmaschine mit konstanter Geschwindigkeit laufen und nehme deren Strom durch eine Reihenfolge verschiedener Widerstände (unter Anwendung eines Regulierwiderstandes) auf, wobei man von einem sehr großen Widerstand so lange bis zu einer immer kleineren Widerstandsstufe übergeht, bis die Maschine anfängt sich stark zu erwärmen und dadurch die Gefahr einer Beschädigung der Isolation sich nähert. Die hierbei auftretenden, mittels eines Strommessers (Ampèremeters) gemessenen Stromstärken trägt man in passendem Maßstabe als Abscissen auf der horizontalen Linie 0 X (Fig. 155) und die dazu gehörigen Spannungen (Potentialdifferenzen oder elektromotorischen Kräfte) nach Maßgabe eines Spannungsmessers (Voltmeters) als Ordinaten auf der senkrechten Linie 0 X auf, um daraus die entsprechende Kurve 0 a b c, als Charakteristik der Maschine, herzustellen.

Aus dieser Kurve ist ersichtlich, daß für schwache Stromstärken der Maschine die Spannung proportional mit der Stromstärke ansteigt, so daß die Kurve eine gerade Linie zwischen 0 und a bildet, hat die Stromstärke aber eine gewisse Grenze, in diesem Falle beispielsweise 10 Ampères, erreicht, so nimmt das Anwachsen der Spannung ab, wodurch die beginnende Krümmung der Kurve zwischen a und b angedeutet ist, und bei 15 Ampères hat das Anwachsen der Spannung das Maximum erreicht, worauf für größere Stromstärken eine Abnahme der Spannung eintritt. Hieraus folgt, daß diese

Maschine ihren normalen Gang zwischen den Punkten 0 und a hat, womit die Grenze der von ihr zu erhaltenden Stromstärken und Spannungen gegeben ist. Für stärkere Ströme nimmt der Nutzeffekt der Maschine rasch ab. Die zulässige größte Spannung erreicht die Maschine bei b. Wird die Erhöhung der Stromstärke, durch Verringerung des Widerstandes im äußeren Stromkreise, noch weiter getrieben, so ist Gefahr vorhanden, daß die Maschine sich zu stark erhitzt. Aus dem Diagramm (Fig. 155) ist sofort ersichtlich, ob die Maschine für die gewünschte Leistung in Volt-Ampères oder Watts zu groß oder zu klein ist.

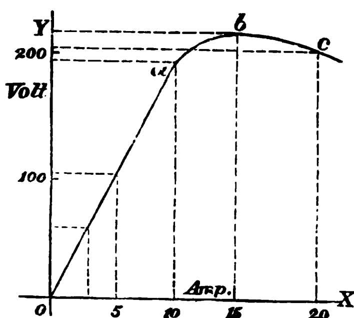


Fig. 155.

Auf dieselbe Weise kann auch die Charakteristik zwischen dem bekannten äußeren Widerstande und der Spannung gezeichnet werden, um zu bestimmen, wie die Spannung sich zur Veränderung des äußeren Widerstandes verhält. Ebenso kann man die Charakteristik zwischen äußerem Widerstande und Stromstärke aufzeichnen, um das Verhältnis beider darzustellen und zu zeigen, zwischen welchen Grenzen des Widerstandes der Strom nahezu konstant bleibt. Durch Veränderung der Umlaufs-geschwindigkeit der Maschine und Aufnahme des Stromes

durch einen gewissen Widerstand kann man zeigen, welche Verhältnisse zwischen Tourenzahl und Stromstärke, oder zwischen Tourenzahl und Spannung bestehen. Wird ferner auch der Widerstand mit der Umlaufsgeschwindigkeit verändert, so kann man durch eine Reihe von Kurven, die ähnlich wie die oben dargestellte konstruiert worden sind, zeigen, welche Wirkung die Veränderung der Tourenzahl bei verschiedenem Widerstande im äußeren Stromkreise hervoruft. Aus solchen Charakteristiken für die Umlaufsgeschwindigkeiten ist zu ersehen, auf welche Weise man durch die Umlaufsgeschwindigkeit das Verhältnis zwischen Stromstärke und Spannung verändern kann, was wiederum durch Kurven sichtbar gemacht wird, die mittels der Stromstärken und Spannungen ähnlich der in Fig. 155 dargestellten Charakteristik gezeichnet sind. Um zwei ähnliche Charakteristiken mit einander vergleichen zu können, müssen dieselben nach gleichem Maßstabe gezeichnet sein.

Zweiunddreißigstes Kapitel.

Die Wechselstrommaschinen.

154. Eigentümlichkeiten der Wechselstrommaschinen. — Die Wechselstrommaschinen bestehen wie die Gleichstrommaschinen aus einem Magnetfelde und einem Anker, der durch ein System von Drahtspulen gebildet wird. Einer von beiden Teilen ist drehbar, um mittels der Bewegung der relativen Ankerdrähte durch das Magnetfeld die Induktion zu bewirken. Gewöhnlich ist der Anker der drehbare Teil; bei einigen Typen wird aber das Magnetfeld um den ruhenden Anker bewegt. Die Ankerspulen werden zuweilen ohne Eisenkerne, meist aber mit Eisenkernen hergestellt; zwar geben dieselben Anlaß zur Erwärmung der Spulen, aber sie verstärken auch in hohem Grade die Induktionswirkung.

Da bei den Wechselstrommaschinen die in ihrer Richtung wechselnden Induktionsströme des Ankers direkt, ohne Gleichrichtung, in den äußeren Stromkreis gesendet werden, so brauchen diese Maschinen keinen Kommutator, sondern sie sind zur Abnahme des Stromes mit zwei von einander isolierten Metallringen versehen, auf denen die Bürsten schleifen. Hierdurch wird die Konstruktion vereinfacht und der Betrieb erleichtert, indem die Entstehung von Funken an den Bürsten vollständig beseitigt ist. Da bei diesen Maschinen keine neutrale Zone vorhanden ist, so ist die Bürstenstellung nicht von der Beanspruchung der Maschine abhängig.

Ferner besitzen die Wechselstrommaschinen vor den Gleichstrommaschinen den Vorzug, daß die Ankerspulen sich in der mannigfachsten Art bequem verbinden lassen.

Die Wickelung der Wechselstrommaschinen läßt sich in sehr einfacher Weise durch Benutzung einzelner Ankerspulen ausführen und die Isolation der Spulenbewickelung von den Metallteilen der Maschine kann mit größter Sicherheit ausgeführt werden, weshalb sich die Wechselstrommaschinen viel besser als die Gleichstrommaschinen für hohe Spannung benutzen lassen.

Endlich gestatten die Wechselstrommaschinen auch eine Anordnung, die für hohe Stromstärken die günstigste ist und die bei Gleichstrommaschinen nicht hergestellt werden kann. Es beruht diese Anordnung darauf, daß der Anker unbeweglich bleibt und das Magnetfeld in Rotation versetzt wird, so daß der Strom ohne Anwendung von Schleifbürsten unmittelbar in die feststehenden Klemmen der Maschine und von da in den äußern Stromkreis übergeführt werden kann.

Mit Rücksicht auf diese Vorzüge und insbesondere noch mit Rücksicht darauf, daß die hochgespannten Ströme der Wechselstrommaschinen sich für bedeutende Energieübertragung mit geringer Stromstärke durch dünne und folglich verhältnismäßig billige Leitungen auf weite Entfernungen führen lassen, hat neuerdings die Benutzung dieser Maschinen

einen bedeutenden Aufschwung erfahren, wobei besonders die Anwendung von Transformatoren in Frage kommt.

155. **Konstruktion der Wechselstrommaschinen.** — Die Wechselstrommaschinen werden im allgemeinen in der folgenden Weise ausgeführt:

Das magnetische Feld wird durch zwei Reihen kreisförmig angeordneter, an zwei vertikalen Gestellen befestigter, einander mit entgegengesetzten Polen gegenüberstehender Magnete gebildet, zwischen denen eine Reihe entsprechend angeordneter flacher Drahtspulen als Anker rotieren. Hierdurch werden in den Spulen elektrische Ströme von wechselnder Richtung erregt.

Die Zahl der Ankerspulen, die kranzartig auf einer Scheibe angebracht sind, entspricht der Zahl der vorhandenen, durch je zwei gegenüberstehende Magnetpole gebildeten magnetischen Felder.

Fig. 156 zeigt den einen Kranz der Magnetpole und die vor diesen Polen bei der Rotation des Ankers vorüberstreichenden Spulen, die hier, der Einfachheit wegen, in einer einzigen Drahtwindung dargestellt sind. Der den dargestellten Polen gegenüberstehende Kranz von Magnetpolen ist natürlich außerhalb der Papierfläche zu denken. Die Abbildung stellt den Moment dar, wo in den Ankerspulen das Maximum der Induktion eintritt. In der Wirklichkeit wird das Maximum der Induktion eintreten, wenn die Anordnung derartig ist, daß die zwischen zwei benachbarten Magnetfeldern befindliche Spule beiderseits

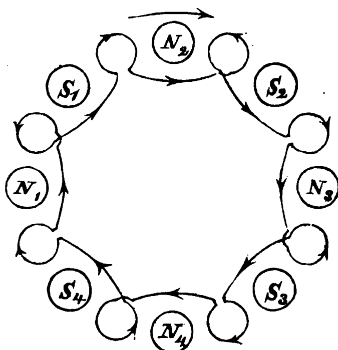


Fig. 156.

durch die Mitte dieser Magnetfelder geht. Die Spulen können mit oder ohne Eisen angeordnet werden.

In den ältesten Wechselstrommaschinen wurden Stahlmagnete zur Bildung der magnetischen Felder benutzt, in den neueren Wechselstrommaschinen sind dagegen der stärkern Wirkung wegen Elektromagnete angebracht, die durch einen Gleichstrom erregt werden. Dieser Gleichstrom wird entweder von einer besondern dynamoelektrischen Gleichstrommaschine geliefert, oder es wird ein Teil der erregten Wechselströme mittels eines Kommutators in gleiche Richtung gebracht und der so erzeugte Gleichstrom in die Bewickelung der Elektromagnete geführt.

156. Die Hauptformen der Wechselstrommaschinen. — Die Wechselstrommaschine der Firma Siemens & Halske ist als die erste vervollkommnete Konstruktion zu nennen; dieselbe ist in Fig. 157 und 158 S. 332 dargestellt. Auf einer Grundplatte sind zwei gußeiserne Ständer von kreisförmiger Gestalt befestigt. Jeder dieser Ständer trägt an seiner innern, dem gegenüberstehenden Ständer zugekehrten Seite eine Reihe kreisförmig angeordneter Elektromagnete, deren gegenüberstehende Polenden mit sektorenförmigen Eisenplatten versehen sind, wie aus Fig. 159 S. 333 ersichtlich ist. Diese Platten stehen einander so nahe gegenüber, daß sehr kräftige magnetische Felder gebildet werden, durch welche flache, aus isoliertem Kupferdraht gewickelte, kreisförmig um die Maschinenwelle an einer Messingscheibe angeordnete Spulen rotieren können, die so nahe als möglich an den Polplatten vorübergehen. Diese Drahtspulen können kreisförmig oder oval sein, welche letztere Form, den Polplatten entsprechend, in Fig. 159 schematisch dargestellt ist; dieselben sind um einen Kern von Holz oder Messing gewickelt, da bei dieser Maschine die Ankerspulen ohne Eisen sind. Wird die Welle in Umdrehung versetzt, so durchlaufen die Spulen die mittels einer besondern kleinen Gleichstrommaschine (Erregungsmaschine genannt) erregten magnetischen Felder, wobei die Anordnung derartig getroffen ist, daß jede Spule

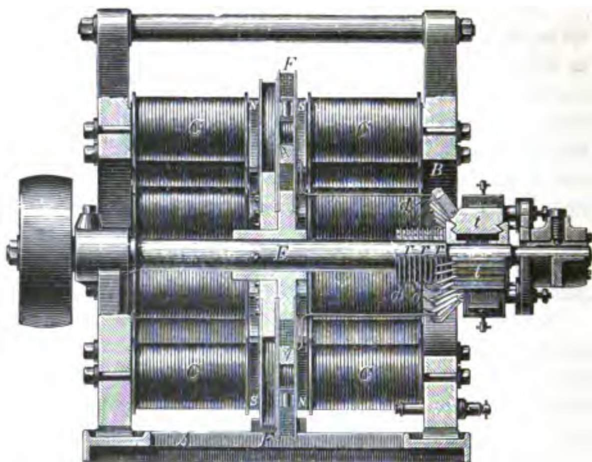


Fig. 157.

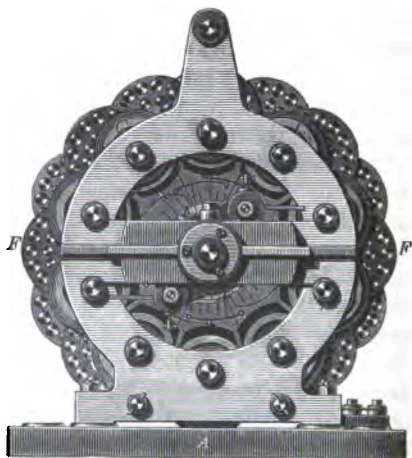


Fig. 158.

beim Übergange von einem Magnetfelde zum andern momentan sich zur Hälfte in dem einen und zur Hälfte in dem andern, entgegengesetzt polaren Magnetfelde befindet. In den größeren Maschinen dieser Art sitzen die Spulen zwischen sehr dünnen Neusilberblechen, die des Luftdurchzuges wegen zur Abkühlung der Spulen durchlöchert sind, wie aus Fig. 158 ersichtlich ist.

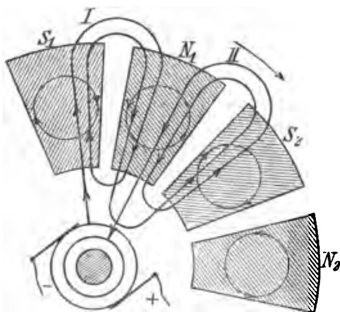


Fig. 159.

Die bei der Umdrehung der Spulen in denselben induzierten Stromimpulse werden entweder getrennt oder parallel, beziehungsweise hinter einander geschaltet vereinigt und mittels zweier auf je einem Kontaktringe schleifenden Bürsten in den äußern Stromkreis geleitet.

Die Wechselstrommaschinen der Firma Siemens & Halske fanden in den Jahren 1878 bis 1882 eine sehr ausgebreitete Verwendung, so daß etwa gegen tausend solcher Maschinen von 6 bis gegen 30 Pferdestärken in Betrieb gesetzt wurden.

Fig. 160 S. 334 ist die Abbildung einer großen von derselben Firma gebauten Wechselstrommaschine mit direktem Betrieb durch eine stehende Zweicylinderdampfmaschine. Diese Wechselstrommaschine ist ähnlich der ältesten von dieser Firma gebauten Wechselstrommaschine. Der aus sechzig Spulen gebildete Schenkelring bewegt sich in dem feststehenden Anker, der mit der gleichen Anzahl von Induktionsspulen versehen ist. Der äußere Durchmesser des rotierenden Schenkelringes beträgt etwa 4000 mm. Die Schenkel werden durch besonders erzeugten Gleichstrom erregt. Diese Maschine liefert Wechselströme von 2000 Volt Spannung.

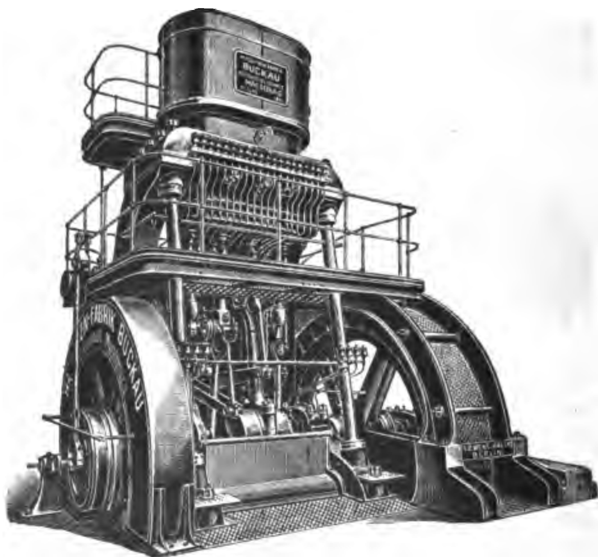


Fig. 160.

Die Ferranti-Thomson-Wechselstrommaschine (Fig. 161) schließt sich nach der scheibenartigen Form ihres Ankers an die Siemens-Halske-Maschine an. Die von *Ziani de Ferranti*, *William Thomson* und *Alfred Thomson* ausgearbeitete Maschine wurde 1883 in London vor die Öffentlichkeit gebracht. In dieser Maschine sind zwei Systeme zu je sechzehn im Querschnitt sektorförmige Elektromagnete so angeordnet, daß deren Pole sowohl in der Aufeinanderfolge als auch im Gegenüber abwechseln.

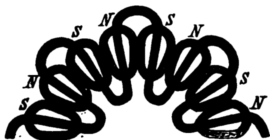


Fig. 161.

Die Wechselstrommaschine von Gramme, Fig. 162 bis 164. Dieselbe besteht aus einer gußeisernen Grundplatte, worauf gußeiserne, nahezu kreisförmige Ständer aufgebolzt

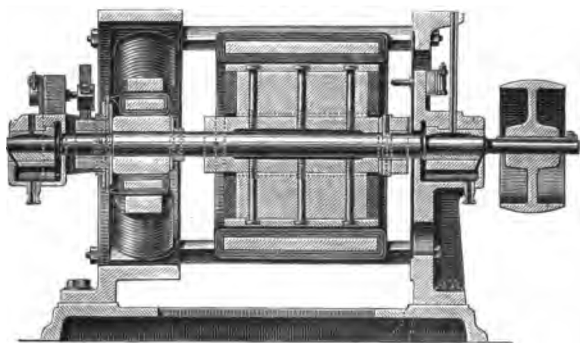


Fig. 162.

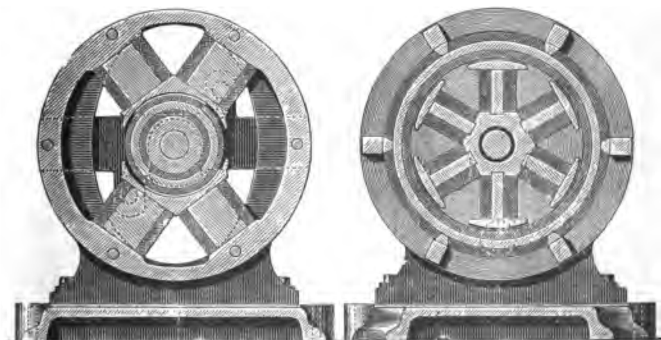


Fig. 163. Fig. 164.

sind. Diese Ständer sind durch sechs im Querschnitt quadratische Riegel verbunden und mit Lagern für die durchgehende Welle versehen. Der vordere Ständer hat im

Innern vier Rippen, woran die Kerne der Elektromagnete der erregenden Gleichstromhilfsmaschine sitzen, die als Ringmaschine angeordnet ist. Bei dieser Wechselstrommaschine ist der ringförmige Anker fest und innerhalb desselben sind die zur Rotation auf der Welle sitzenden sternförmig angeordneten Elektromagnete angebracht, so daß diese Maschine als eine Art Innenpolmaschine zu betrachten ist. Der feste Ringanker ist ganz ähnlich dem Gramme-Ring eingerichtet; derselbe besteht aus einem Ringe von weichen Eisenlamellen oder Eisendraht und ist mit den isolierten Kupferdrahtspulen bewickelt. Diese Spulen sind aber in der Weise angeordnet, daß je auf ein Achtel des Ringumfanges die Drähte nach der einen und im nächsten Achtel des Umfanges nach der entgegengesetzten Richtung gewickelt sind, wobei der Anordnung von acht Feldmagneten Rechnung getragen ist.

Die acht Feldmagnete sind mittels zweier gußeiserner Kränze und einer achtseitigen gußeisernen Nabe befestigt und es sind dieselben abwechselnd nach der einen und der andern Richtung bewickelt, so daß, wenn man dieselben fortlaufend mit 1, 2, 3 bis 8 bezeichnet, beispielsweise die geraden Nummern die positiven Pole, die ungeraden Nummern die negativen Pole bezeichnen, die sich dem festen Ringanker zukehren und bei der Rotation abwechselnd an den entgegengesetzt gewickelten Ankerspulen vorüberstreichen, wobei jedem Magnetpole vier Ankerspulen entsprechen, indem deren zweiunddreißig vorhanden sind. Da die Pole in jedem Moment symmetrisch auf die Ankerspulen einwirken, so ist auch in jeder entsprechenden Spule der acht Ankerspulengruppen, beispielsweise in der ersten Spule jeder der acht Gruppen, die Induktionswirkung gleich groß; ebenso ist die Induktionswirkung auch in den zweiten Spulen jeder der acht Gruppen von derselben Größe, aber von der Wirkung in den ersten Spulen verschieden ꝛc. Will man also beispielsweise aus der Maschine vier Wechselströme ableiten, so braucht man nur die ersten, zweiten, dritten und vierten Spulen jeder der acht Ankerspulengruppen unter sich hinter

einander zu schalten. Ebenso lassen sich aber auch durch entsprechende Schaltung der Ankerspulen acht, sechzehn oder selbst zweiunddreißig von einander unabhängige Wechselströme ableiten. Um diese Schaltungsweisen beliebig zur Ausführung bringen zu können, sind die Enden der Ankerspulen nach Klemmschrauben geführt.

Diese Grammesche Maschine wurde nach vier Modellen für Betriebsstärken von 4 bis etwa 16 Pferden gebaut.

Lontins Wechselstrommaschine (Fig. 165). Bei dieser Maschine ist der Anker fest und die Feldmagnete

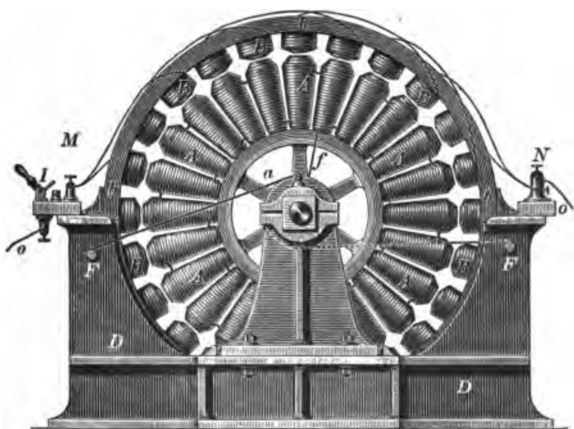


Fig. 165.

rotieren. Das Magnetfeld wird nämlich von vierundzwanzig radial auf einem Radkranze a sitzenden konisch bewickelten, sehr kräftigen Elektromagneten A gebildet. Diese Magnete sind hintereinander geschaltet und die Enden des demnach eine Leitung bildenden Bewickelungsdrahtes sind bei f mit dem auf der Welle sitzenden Kontaktringe verbunden. Die Bewickelung der Feldmagnete ist so angeordnet, daß dieselben

abwechselnd entgegengesetzte Pole bilden. Der zur Erregung der Feldmagnete dienende Strom wird von einer kleinen dynamoelektrischen Hilfsmaschine geliefert, deren Strom durch die Klemmen F F der Hauptmaschine mittels zweier auf dem erwähnten Kontaktringe schleifenden Federn den vierundzwanzig Feldmagneten zugeführt. Der Ankerring b ist mit dem Gestell D fest verbunden; derselbe besteht aus weichem Eisen und ist am inneren Umfange mit vierundzwanzig Eisenkernen B besetzt, die von den Ankerspulen umgeben sind; die Enden dieser Spulenkerne sind den Polen der Feldmagnete möglichst nahe gestellt. Die Drahtenden der Ankerspulen sind abwechselnd nach den entgegengesetzten Seiten des Maschinengestells geführt, so daß die eine Hälfte mit der Klemme M, die andere Hälfte mit der Klemme N verbunden ist. Links am Maschinengestell ist ein Kontaktschließer I auf einem Schaltbrett angebracht, mittels dessen die Ankerspulen in beliebiger Weise gruppiert werden können. Der äußere Stromkreis geht von o aus. Diese Anordnung hat jedoch den Nachteil, daß die massiven Eisenkerne des Ankers sich infolge der Hysteresis und Faucaultströme stark erhitzen, besonders wenn die Maschine nicht voll belastet ist. Die Lontinsche Maschine war 1878 in Paris ausgestellt und wurde mehrfach zur Beleuchtung von Bahnhöfen benutzt.

Als Wechselstrommaschinen mit Trommelanker sind die folgenden Maschinen zu erwähnen.

Wechselstrommaschine von Schuckert. Die Elektromagnete von abwechselnder Polarität mit verbreiterten Polenden sind etwa zu zehn sternförmig auf einem mit der Welle verbundenen Eisencylinder angebracht; dieselben bewegen sich bei der Drehung an den auf einem die Feldmagnete umschließenden hölzernen Hohlcylinder in gleicher Zahl angebrachten Ankerdrahtlagen vorüber. Diese Ankerdrahtlagen sind parallel zur Achse in Schlangenlinien um den Hohlcylinder gelegt.

Wechselstrommaschine von Ganz & Co. (Patent Zipernowski und Déri vom September 1882). Die Konstruktion der Maschine ist neuerdings mit Rücksicht auf die praktische Ausführung wesentlich verbessert worden. Das rotierende Magnetfeld besteht aus sechs bis vierzig radial auf der Welle sitzenden Elektromagneten, deren Kerne in eigentümlicher Weise aus isolierten Eisenblechen gebildet sind. Die Kerne des ringförmigen, die Elektromagnete umgebenden, auf dem Gestell festsitzenden Ankers bestehen aus Tförmigen Eisenblechen, auf welche die Ankerspulen aufgeschoben sind. Jede Induktionsspule mit ihrem Kern bildet daher ein von den übrigen unabhängiges Ganzes, das leicht auseinandergenommen, untersucht und ausgewechselt werden kann. Die Maschine wird für Leistungen von 10 000 bis zu 380 000 Voltampères oder Watts und 1000 bis 5000 Volts Spannung gebaut. Sämtliche Maschinen arbeiten mit 5000 Polwechsel in der Minute. Die verhältnismäßig geringe Wechselzahl (andere Constructeure gehen bis 15 000 Polwechsel und darüber) gewährt mancherlei Vorteile. Erstens läßt sich hierdurch der Wirkungsgrad der Maschine höher halten, da die von der Polwechselzahl abhängigen Arbeitsverluste im Eisen geringer sind. Ferner hat die geringe Polwechselzahl Bedeutung für kleinere Wechselstrommotoren und für die Parallelschaltung der Wechselstrommaschinen.


Fig. 166.


Fig. 167.

Wechselstrommaschine von Jablochkoff (Fig. 166 und 167). Die rotierenden Feldmagnete sitzen in schraubenartig gewundener Form, acht an der Zahl, auf einer Trommel, die auf die Betriebswelle aufgekeilt und von dem fest mit dem Gestell vereinigten Ankerspulenkranze umgeben ist. Die Maschine scheint nicht mehr gebaut zu werden.

Dreiunddreißigstes Kapitel.

Die Wechselstromtransformatoren.

157. Allgemeine Bemerkungen. — Ein Wechselstromtransformator ist ein Apparat, in welchem der Strom nicht wie bei den elektrischen Strommaschinen durch relative Lagenänderung zwischen Magnetfeld und Anker, sondern durch Veränderung des magnetischen Zustandes ruhender Eisenmassen hervorgerufen wird.

Man unterscheidet Transformatoren mit offenem und mit geschlossenem magnetischen Stromkreise. Bei den ersteren ist der Eisenkern ein gerader Cylinder, bezw. ein gerades Prisma; bei den letzteren bildet der Stromkreis einen ringförmigen oder rahmenförmigen Körper. Ferner unterscheidet man Kern- und Manteltransformatoren. Bei den ersteren umgeben die zu induzierenden Kupferspiralen den Eisenkern; bei den letzteren werden die Kupferspiralen vom Eisenkern umgeben. Diese letztere Klasse findet jedoch gegenwärtig kaum noch Anwendung.

Bezüglich des Wirkungsgrades und der praktischen Eigenschaften der Transformatoren mit offenem und geschlossenem magnetischen Stromkreise gehen die Meinungen der Fachleute aus einander. Von einer Seite wird behauptet, daß beide Arten gleich gut seien, von anderer Seite wird den Transformatoren mit geschlossenem Stromkreise der Vorzug gegeben. In der That ist diese Art von Transformatoren am meisten verbreitet.

Für die Benutzung des Wechselstromes sind die Transformatoren von größter Wichtigkeit, indem sie gestatten, die mit sehr hoher Spannung aus der Ferne zugeführten Wechselströme am Verbrauchsorte auf ungefährliche niedrige Spannung, wie sie der Verbrauch erfordert, herabzubringen und somit zugleich die Stromstärke entsprechend zu erhöhen.

158. Beziehung zwischen den Dimensionen und Nutzeffekt der Transformatoren. — Die Entwerfung der Transformatoren kann von verschiedenen Gesichtspunkten aus stattfinden. Man kann nämlich beabsichtigen: in dem einen Falle geringen Energieverlust und relativ hohen Nutzeffekt bei geringer Belastung des Apparates, oder in dem andern Falle geringes Gewicht und starke Leistung, wobei aber der Transformator entsprechend heiß betrieben werden muß, was meist vermieden werden soll und zwecks der Haltbarkeit des Apparates keineswegs in übertriebener Weise stattfinden darf.

Als Beispiel sei ein kleiner Transformator angenommen, der etwa fünf Glühlampen speisen soll und dessen Primärklemmen mit einem Wechselstromkreise von 1000 Volts verbunden sind. Sind die Lampen ausgeschaltet und geht demnach der Transformator leer, so fließt ein ganz geringer Strom, der sogenannte Magnetisierungsstrom oder verlorene Strom, durch die Primärspule. Dieser Strom magnetisiert das Eisen des Apparates und in der Primärspule ist eine elektromotorische Gegenkraft vorhanden, die jeder Transformator entwickeln muß und die ungefähr so groß ist, wie die von der Betriebsdynamomaschine ausgehende elektromagnetische Gegenkraft.

Diese elektromotorische Gegenkraft ist vom Magnetisierungswechsel des Eisens, das ist von der Hysteresis, abhängig und ist mit einem gewissen Energieaufwand verknüpft.

Die erforderliche Eisenmasse und der notwendige Energieaufwand ist natürlich in einem Transformator von geringer Kapazität kleiner, als in einem Transformator von großer Kapazität. Mit Bezug auf die Herstellungskosten, die sich nicht zu hoch stellen sollen, sind mindestens 20 Watts für die Magnetisierungsarbeit als zulässig zu erachten, weil sonst verhältnismäßig bedeutend mehr Kupfer zu verwenden ist.

Ein doppelt so großer Transformator, das ist einer für zehn Glühlampen, hat genau dieselbe Magnetisierungsarbeit

unter sonst gleichen Umständen zu verrichten, indem er eine elektromotorische Gegenkraft zu entwickeln hat, welche der elektromotorischen Kraft der Dynamomaschine gleich und entgegengesetzt ist und durch welche im Eisen ein Verlust von 25 Watts hervorgerufen werden mag.

Wenn die Kapazität des Fünflampen-Transformators 250 Watts und diejenige des Zehnlampen-Transformators 500 Watts beträgt, so beträgt der Energieverlust im ersteren 8 Prozent und der in letzterem 5 Prozent. Ein Zwanziglampen-Transformator kann leicht mit einem Energieverlust im Eisen von nur 30 Watts und ein Vierziglampen-Transformator mit einem Verlust von 45 Watts hergestellt werden. Der Verlust beträgt in diesen Fällen 3 bezw. 2.25 Prozent. Bei größeren Transformatoren wird natürlich der Verlust durch die Magnetisierungsarbeit im Eisen noch geringer. So kann beispielsweise ein Hundertlampen-Transformator mit einem Energieverlust von 1.7 Prozent im Eisen hergestellt werden. Will man aber Transformatoren von noch größerer Kapazität herstellen, so wird man dadurch den Wirkungsgrad mit Bezug auf jenen Verlust nur um einen sehr geringen Betrag erhöhen können. Zieht man die Schwierigkeit der Herstellung und das bedeutende Gewicht so großer Transformatoren, etwa von Fünfhundertlampen-Kapazität, mit einem Energieverlust von etwa 1 Prozent im Eisen in Betracht, so wird man wohl von deren Herstellung absehen und lieber eine entsprechende Anzahl kleinerer Transformatoren, etwa von hundert bis zweihundert Lampen Kapazität, verwenden. Zu kleine Transformatoren sind natürlich, wie aus den obigen Betrachtungen sich ergiebt, unökonomisch und verhältnismäßig kostspielig.

Bis hierher wurde der Verlust durch Magnetisierung des Eisens bei Bewegung des Transformators in Betracht gezogen. Es ist anzunehmen, daß dieser Verlust bei verschiedener Belastung des Transformators sich konstant erhält.

Der Energieverlust im Kupfer bei Stromlosigkeit der Sekundärspule ist zu vernachlässigen, indem der Mag-

netisierungsstrom in der Primärspule sehr gering ist. Dieser sogenannte Kupferverlust wächst aber mit der Belastung des Transformators und zwar proportional zur zweiten Potenz der Stromstärke, das heißt: der Verlust im Kupfer (durch Erwärmung) ist vier mal so groß, wenn 2 Ampères durch die Sekundärspule gehen, als wenn 1 Ampère hindurchgeht. Bei voller Belastung summiert sich der Verlust im Eisen mit dem Maximum des Verlustes im Kupfer. Für mittlere Belastung hat man angenähert denselben Eisenverlust mit einem vom Betrage der Belastung abhängigen Verlust im Kupfer.

Der durch den Ohmschen Widerstand hervorgerufene zulässige Energieverlust im Kupfer ist bei Transformatoren auf 1.5 bis 2 Prozent zu schätzen, vorausgesetzt natürlich, daß der Transformator entsprechend konstruiert ist.

159. **Theorie und Berechnung der Transformatoren.** — Vorausgesetzt ist bei der Konstruktion der Transformatoren, daß deren Kerne aus dünnen, höchstens 0.5 mm-Eisenblechen, die gut ausgeglüht und daher sehr weich und homogen sind, hergestellt sind. Diese Eisenbleche sind durch Papierzwischenlagen von einander magnetisch isoliert und so übereinandergelegt, daß der magnetische Kraftstrom freien Durchgang findet.

Die in der Primär- und Sekundärspule durch den cyklischen Verlauf der durch den Wechselstrom geschaffenen Kraftlinien induzierten elektromotorischen Kräfte E_1 und E_2 sind proportional den Windungszahlen p_1 und p_2 der beiden Spulen, so daß die Proportion gilt

$$E_1 : E_2 = p_1 : p_2.$$

Das Verhältnis der primären zur sekundären elektromotorischen Kraft wird als der Transformations- oder Umsetzungskoeffizient bezeichnet.

Bezeichnet man mit i_1 und e_1, mit i_2 und e_2 die mittlere Stromstärke und die mittlere elektromotorische Kraft im

Primär- und im Sekundärstromkreise, so ist der Wirkungsgrad des Transformators

$$\eta = \frac{i_2 e_2}{i_1 e_1}.$$

Die mittels der Stromstärken i_1 und i_2 unter Einfluß der Windungszahlen p_1 und p_2 erzeugte Kraftlinienzahl wird bestimmt durch die Gleichung

$$N = \frac{4 \pi \mu q (i_1 p_1 + i_2 p_2)}{l},$$

wobei μ den magnetischen Widerstand (die Permeabilität), q den Querschnitt und l die Länge des magnetischen Stromkreises bezeichnen.

Für die gegenseitige Induktion gilt die Formel

$$M = \frac{4 \pi p_1 p_2 \mu q}{l}$$

und für die Selbstinduktion in den beiden Spulen

$$L_1 = \frac{4 \pi p_1^2 \mu q}{l} \text{ und } L_2 = \frac{4 \pi p_2 \mu q}{l}.$$

Den günstigsten Wert für den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion ergiebt die Gleichung

$$M = \sqrt{L_1 . L_2}.$$

Der Arbeitsverlust durch die Hysteresis vergrößert sich mit der Wechselzahl.

Nach Ewing erfordert 1 ccm weiches Eisen für die maximale Induktion B = 5950 eine Magnetisierungsarbeit von 2190 Watts.

Die Maximalinduktion ist zu bestimmen nach der Gleichung

$$B = \frac{9 . E . 10^8}{10 . 4 . p . q . z}.$$

Bezüglich dieser Formel ist folgendes zu bemerken: Wenn man mit E die maximale elektromotorische Kraft bezeichnet, so ergiebt $^9/_{10}$ E die mittlere elektromotorische Kraft; ferner bezeichnet p die Windungszahl des primären oder sekundären Stromkreises. Es ist vorzuziehen in dieser Formel die Elemente derjenigen Bewickelung in der Formel einzusetzen, welche dem Kern am nächsten liegt; q ist der Querschnitt des Eisenkernes und z die Wechselzahl.

Bezeichnet man mit p das spezifische Gewicht des Kupferdrahtes, mit p die auf die Primät- oder Sekundärspannung reduzierte Gesamtwindungszahl, wobei die oben gegebene Gleichung

$$E_1 p_2 = E_2 p_1$$

zu benutzen ist, mit l die mittlere Länge einer Drahtwindung in Metern, mit q den Drahtquerschnitt in Millimetern, mit k den spezifischen Widerstand des Kupfers, mit W den Drahtwiderstand der gesamten Wickelung auf die Primär- oder Sekundärspannung reduziert, so gilt zur Bestimmung des Kupfergewichts G die Gleichung

$$G = 10^{-3} \frac{r k l^3}{W} p^2.$$

160. Beschreibung einiger Formen von Wechselstromtransformatoren. — Transformator von Ganz & Co. in Budapest (Fig. 168 S. 346). Der Induktionsapparat ist kreisförmig. Er besteht aus einem inneren, magnetisch und mechanisch vollkommen geschlossenen Bandeisenkern, auf den zuerst die primäre, dünndrähtige und darüber die sekundäre dickdrähtige Bewickelung in gleichmäßiger Verteilung auf der Kernoberfläche aufgewickelt sind. Die beiden Bewickelungen sind sowohl von einander, als auch vom Eisenkerne sorgfältig isoliert, so daß ein Kurzschluß zwischen den beiden Bewickelungen nicht vorkommen kann.

Der so hergestellte eigentliche Induktionsapparat wird zwischen gefirnißte Holzklammern gefaßt und zwischen zwei ringförmigen Eisenscheiben festgehalten. Die untere Scheibe

ist mit drei Füßen versehen, während auf der oberen Scheibe zwei Primär- und drei Sekundärklammern angebracht sind, die zugleich als Sicherheitsschaltungen dienen. Die mittlere Klammer dient zur Abzweigung von Bogenlampen.

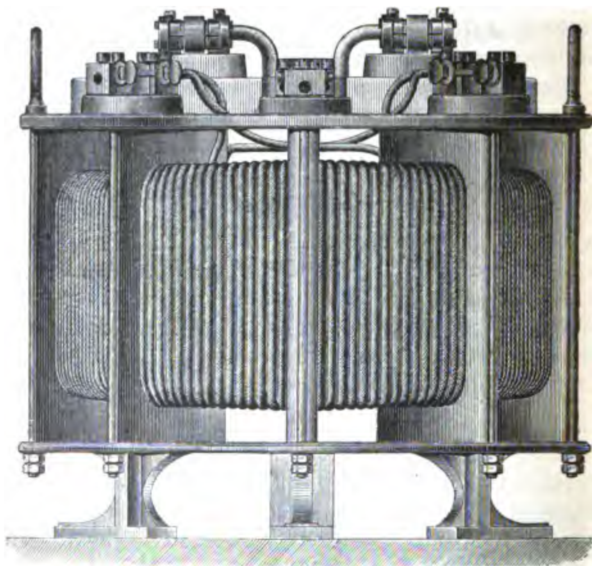


Fig. 168.

Transformator von Siemens & Halske, Berlin (Fig. 169). Die Abbildung zeigt den in ein Gehäuse eingeschlossenen Transformator; derselbe besteht aus einem geschlossenen ovalen ringförmigen Eisenkern, der auf den beiden Langseiten mit den übereinandergelegten Primär- und Sekundärbewickelungen versehen ist.

Transformator von Ferranti. Fig. 170 zeigt diesen Transformator zur Hälfte im Vertikaldurchschnitt.

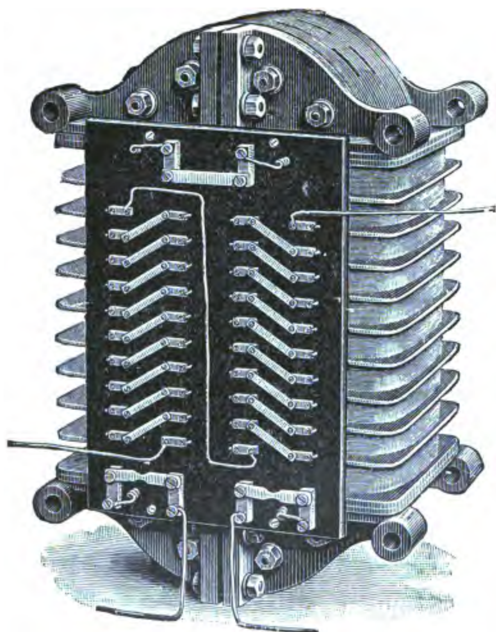


Fig. 169.

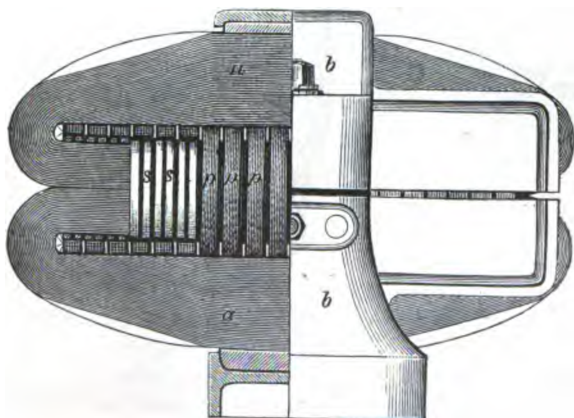


Fig. 170.

Die Primär- und Sekundärbewickelung s und p ist auf einem Bündel von Eisenblechstreifen angebracht. Nach Aufbringung der Bewickelung sind diese Blechstreifen zur Hälfte nach oben und zur andern Hälfte nach unten umgebogen, so daß ein doppelter magnetischer Stromkreis gebildet wird. Das Ganze ist von einem aus zwei zusammengebolzten Teilen gebildeten Gußeisengestell festgehalten.

Achter Abschnitt.

Die elektrische Beleuchtung.

Vierunddreißigstes Kapitel.

Die elektrischen Lampen.

161. **Der elektrische Lichtbogen.** — Als starke Lichtquelle wird das sogenannte Bogenlicht, als mildere Lichtquelle das Glühlicht benutzt. Der Voltasche Lichtbogen entsteht, wenn in einen von einem genügend starken elektrischen Strome gespeisten Stromkreis zwei stabförmige Stücke Hartkohle (künstlich hergestellte Stifte aus Graphit u. s. w.) eingeschaltet, zuerst in Berührung gebracht und dann langsam bis auf geringe Entfernung auseinandergezogen werden. Die Formen des so hergestellten Lichtbogens sind in Figur 171 unter A und B dargestellt, doch sind die Kohlenstäbe statt vierkantig cylindrisch zu denken.

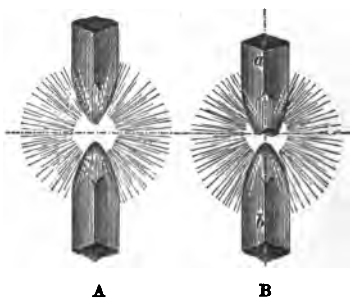


Fig. 171.

Wird der Lichtbogen mittels Wechselströme erzeugt, so spitzen sich die Enden der Kohlenstäbe gleichförmig zu und beide Kohlen werden ganz gleichmäßig verbraucht, indem ihre Polarität eine wechselnde ist. Wird dagegen der Lichtbogen mittels Gleichstromes erzeugt, so stumpft sich der den Strom aussendende und also positive Kohlenstab am Ende ab und höhlt sich aus, so daß ein sogenannter „Krater“ entsteht, der ein sehr intensives Licht ausstrahlt, während der untere, negative, sich zuspitzende Kohlenstift ein viel schwächeres Licht ergiebt. Daraus folgt die Regel, daß bei Bogenlampen die positive, den Lichtkrater bildende Kohle zu oberst angebracht wird, um so das stärkste Licht nach unten zu strahlen. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß die positive Kohle etwa doppelt so rasch als die untere verbrennt, weshalb dieselbe einen doppelt so starken Querschnitt, als die untere Kohle erhält, um zu bewirken, daß die Länge der beiden Kohlenstäbe gleichmäßig abnimmt und dieselben möglichst lange aushalten.

Anstatt die Kohlenstäbe senkrecht übereinander in den Lampen anzubringen, giebt man denselben für gewisse Zwecke auch eine schräge oder horizontale Stellung. Ferner giebt man auch wohl den Lichtkohlen eine scheibenartige Form, jedoch ist die stabförmige, die cylindrische die gebräuchlichste. Im allgemeinen ergeben dünnere Kohlenstäbe im Verhältnis zum Energieverbrauch ein stärkeres Licht als dickere, da jedoch dünnere Stäbe rascher verbrennen als dickere, so ist hierbei mit Bezug auf Brenndauer und Unterhaltungskosten der Lampe eine Grenze gezogen.

Was die Glühlampen anbelangt, so wirkt bei denselben der Widerstand eines Kohlenfadens als Widerstand gegen den Strom und dadurch wird das Glühen dieses Kohlenfadens herbeigeführt. Damit hierbei aber der Kohlenfaden nicht verbrennt, sondern eine möglichst lange Brenndauer ergiebt, so muß derselbe in dem möglichst stark luftverdünnten Raume eines Glasgehäuses untergebracht werden.

Bogenlampen werden im allgemeinen für Stromstärken von 3 bis 20 Ampères und für Spannungen von 36 bis 45 Volts hergestellt. Doch baut man für Signallichter Bogenlampen auch für viel stärkere Ströme. Glühlampen erfordern gewöhnlich Stromstärken bis zu etwa 0.8 Ampère bei Spannungen von 65 bis 100 Volts.

Die Lichtstärke der gewöhnlichen Bogenlampen beträgt zwischen 600 und 1200 Normalkerzen, die der gewöhnlichen Glühlampen 12 bis 30 Normalkerzen. Man stellt aber auch Glühlampen bis zu 500 und mehr Normalkerzen her, ebenso kann man auch bei Bogen- und Glühlampen noch weit unter die angegebene niedrigste Zahl von Normalkerzen herabgehen, jedoch werden die Lampen dann unökonomisch.

162. **Die Bedingungen zur Erhaltung gleichmäßiger Lichtstärke bei Bogenlampen.** — Hierzu ist nötig, daß die Lampe stets die gleiche, zur Umwandelung der von der Lampe verlangten Lichtmenge nötige Energiemenge verbraucht und daß die dabei im Lichtbogen entwickelte Wärmemenge, Temperaturhöhe und Ausstrahlung sich stets gleich bleiben. Die erste Bedingung wird durch das Zusammenwirken der Lampe mit dem Elektrizitätserzeuger, die zweite Bedingung durch die Beschaffenheit der als Elektroden dienenden Kohlenstäbe erfüllt.

Der Teil der elektrischen Energie, welcher in Wärme und Licht umgesetzt wird, ist von der Konstruktion der Lampe und von dem System der Elektrizitätslieferung abhängig. Da die elektrische Energie durch das Produkt aus Spannung und Stromstärke, das ist durch die Größe der Volt-Ampères oder Watts gegeben ist, so muß die Lampe für konstante Leuchtkraft so eingerichtet sein, daß diese Größe auf gleicher Höhe erhalten wird. Es ist hierbei zu berücksichtigen, daß der Lichtbogen nicht als bloßer Widerstand im elektrischen Stromkreise wirkt, sondern daß derselbe eine elektromotorische Gegenkraft erzeugt und einen dem die Lampe erregenden Strom entgegengesetzten Strom hervorzurufen sucht. Diese elektromotorische Gegenkraft wird auch als Polarisation bezeichnet.

Ist der Lichtbogen zu kurz, so macht sich in demselben ein Pfeifen und Zischen bemerklich und an der Spitze der negativen Kohle entstehen unregelmäßige Auswüchse oder sogenannte Pilze; auch macht sich ein Zittern im Lichtbogen bemerklich.

Bezüglich der Anordnung einer Bogenlampe ist stets zu berücksichtigen, daß dieselbe von den Bedingungen abhängig ist, unter denen sie vom Stromkreise mit elektrischer Energie versorgt wird.

Die Bogenlampen sind für Speisung mit konstanter Spannung oder für Speisung mit konstantem Strom eingerichtet. Im ersten Falle werden die Lampen entweder einzeln parallel oder in Reihen parallel geschaltet, indem die Ströme durch Zweigleitungen nach den Lampen verteilt werden. Im letzteren Falle sind die Lampen hintereinander, das ist in Reihe zu schalten. Hierzu ist aber nötig, daß jede Lampe mit einer Vorrichtung versehen ist, welche dem Stromkreis einen neuen Weg eröffnet, sobald die Kohlen abgebrannt sind oder zufällig versagen. Dies geschieht durch eine sogenannte Kurzschlußvorrichtung.

Da die Kohlen allmählich verbrennen, so muß mindestens eine derselben entsprechend vorgeschoben werden. In der Regel wird die dazu dienende Vorrichtung zur Bewegung der oberen Kohle benutzt, während die untere fest mit dem Gestell der Lampe verbunden ist. Nur wenn der Brennpunkt der Lampe in gleicher Höhe verbleiben soll, wird auch die untere Kohle mit einer Vorschiebvorrichtung versehen, so daß man durch Verschiebung der beiden Kohlen eine Lampe mit konstantem Brennpunkte erhält.

Die zur Verschiebung der Kohlen dienende Vorrichtung wird als Regulierungsvorrichtung bezeichnet. Als treibende Kraft der Reguliervorrichtung benutzt man:

die Schwere des oberen Kohlenhalters,
die Treibkraft einer aufgewundenen Spiralfeder,
die anziehende Kraft eines Elektromagnets oder Solenoids oder auch
die treibende Kraft eines Elektromotors.

163. Betriebsarten der elektrischen Bogenlampen. — 1. Betrieb durch Gleichstrom mit konstanter Spannung. In diesem Falle werden die Bogenlampen entweder einfach parallel oder in gruppenweiser Reihenschaltung parallel geschaltet, indem der Strom der Hauptleitung durch Zweigleitungen, die beiderseits mit der Hauptleitung verbunden sind, nach den Lampen verteilt wird. Die Zweigleitungen sind selbstverständlich derartig mit der Hauptleitung zu verbinden, daß die nötige Spannungsdifferenz, zwischen 40 bis 50 Volts, je nach der Einrichtung der Lampe, erhalten wird. Um ein stattliches Licht der parallel geschalteten Lampen zu erhalten, ist denselben ein Widerstand vorzuschalten und dabei darauf Rücksicht zu nehmen, daß die Spannung im Hauptstromkreise der Lampe auf die entsprechende Höhe gebracht wird.

2. Betrieb durch Gleichstrom mit konstanter Stromstärke. In diesem Falle werden die Lampen in Reihe geschaltet, so daß der volle Strom von einer Lampe zur nächsten geht und nach Austritt aus der letzten Lampe zur Dynamomaschine zurückkehrt. Die Leitungsanlage für diese Betriebsweise ist billiger als bei Parallelschaltung, für die man stärkere Leitungen anzulegen hat, als für die durch höher gespannten Strom gespeiste Reihenschaltung. Die Lampen sind jedoch in diesem Falle so einzurichten, daß jede einen Kurzschluß bildet, sobald ihr Lichtbogen erlischt und somit der Stromweg durch die Kohlen dieser Lampe unterbrochen wird. Erfolgt in diesem Falle die Kurzschlußbildung nicht, so erlöschen auch sämtliche übrige Lampen der Reihe.

3. Betrieb durch Wechselstrom mit konstanter Spannung. Die Lampen werden einzeln oder gruppenweise parallel geschaltet, wie im ersten Falle, jedoch sind dieselben in gewissen Einzelheiten anders eingerichtet, insbesondere sind die Magnete, um den Wechselströmen Folge leisten zu können, aus dünnen Eisenblechen zusammengesetzt.

4. Betrieb durch Wechselstrom mit konstanter Stromstärke. Die Lampen sind, wie im zweiten Falle, in Reihe geschaltet und entsprechend eingerichtet.

Für die Einrichtung einer Bogenlampe können maßgebend sein: Regulierung auf Bogenlampe, auf Stromstärke, auf Spannung oder auf Widerstand, so daß eine dieser Größen mit Bezug auf den Lichtbogen konstant erhalten wird, wobei aber anderseits auch für entsprechende Regulierung des äußeren Stromkreises entweder mit Bezug auf Konstanterhaltung der Spannung oder Konstanterhaltung der Stromstärke gesorgt sein muß.

164. Arten der Bogenlampen mit Bezug auf Regulierung und Konstanterhaltung des Lichtbogens. — 1. Bogenlampen mit Regulierung auf gleiche Lichtbogenlänge. Es sind dies die sogenannten Kerzenlampen.

Die einfachste Art der Bogenlampe ist durch die Jablochkoffsche Kerzenlampe Fig. 172 dargestellt. Dieselben sind nur durch Wechselströme zu betreiben, um einen gleichmäßigen Abbrand der Kohlenstäbe herbeizuführen, welche hier parallel fest neben einander gestellt und durch eine Isoliermasse (Gips) getrennt sind. Die normale Länge des Lichtbogens ist also durch die feste Entfernung der beiden Kohlenstäbe bestimmt. Die Isoliermasse schmilzt und verdampft in der Hitze des Lichtbogens, so daß die Enden der Kohlenstäbe nach Maßgabe des Abbrennens derselben frei werden.

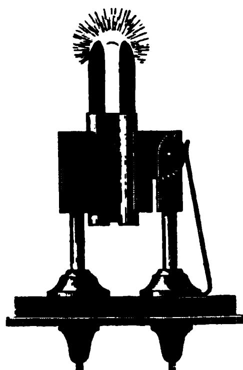


Fig. 172.

Die Entzündung des Lichtbogens wird dadurch herbeigeführt, daß zu Anfang die beiden oberen Enden der Kohlenstäbe durch ein Glimmerplättchen oder einen Kohlen=

pulver enthaltenden Kitt verbunden sind. Der Betrieb muß durch Wechselstrom erfolgen, damit die Kohlen gleichmäßig abbrennen. Diese Kerzenlampen sind nur noch vereinzelt im Gebrauch, da sie ungleichmäßig brennen und öfters verlöschen.

Als Kerzenlampe ist noch die von Leroux in Vorschlag gebrachte „Soleillampe“ zu nennen; dieselbe besteht aus zwei geneigten, mittels Spiralfedern gegen einen Marmorblock gepreßten Kohlenstäben (Fig. 173). Auch diese Lampen sind unvollkommen und kaum noch in Gebrauch.

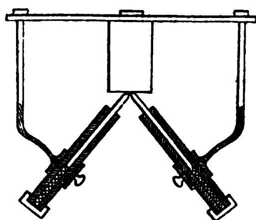


Fig. 173.

2. Bogenlampen mit Regulierung auf gleiche Stromstärke. Hierher gehören die ältesten, zumteil mit Uhrwerk versehenen Bogenlampen.

Das Prinzip ist in einfachster Form durch Fig. 174 dargestellt. Die obere, an einem Hebelarm hängende Kohle sucht sich durch ihr Gewicht der unteren Kohle zu nähern, wogegen ein vom Lampenstrom durchflossenes Solenoid mit beweglichem Kern die obere Kohle zu heben strebt. Wird durch das Abbrennen der Kohlen der Lichtbogen und folglich dessen Widerstand größer, so nimmt die Stromstärke ab, der Elektromagnet wird schwächer und läßt somit ein Sinken der oberen Kohle zu.

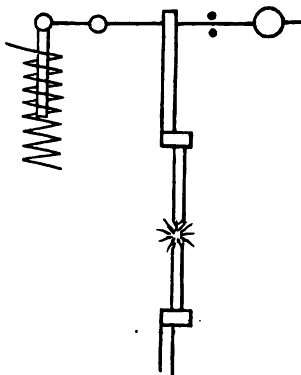


Fig. 174.

Die erste wirklich brauchbare selbstthätige elektrische Lampe (Fig. 175) wurde 1848 von Foucault-Duboscq ausgeführt; dieselbe wird jetzt noch zur Bühnenbeleuchtung in Theatern und für Projektionszwecke bei wissenschaftlichen Vorträgen benutzt. Beide Kohlenhalter A und B sind mit einer Zahnstange verbunden, welche auf den entgegengesetzten Seiten einer Welle in darauf sitzende Zahnräder eingreifen, deren Durchmesser sich wie 1 : 2 verhalten und welche in die mit einem Federhause E verbundenen Zahnräder eingreifen, so daß die Kohlenspitzen im Verhältnis ihres Abbrandes, d. h. die positive doppelt so rasch als die negative, vorgeschoben werden, um deren Distanz dem Abbrande entsprechend zu regulieren und die Lichtquelle in derselben Höhe zu erhalten. F_2 ist ein zweites Federhaus, welches mit einem vielfachen Rädersystem kombiniert ist, das in die Getriebe von zwei entgegengesetzt liegenden Windfängen g und g′ eingreift. S ist ein Planetenrad, welches mit den beiden Rädersystemen so in Eingriff steht, daß es gleichzeitig das eine freiläßt, während es das andere hemmt. Unter dem Rädermechanismus befindet sich ein isolierter Elektromagnet m mit dem um a oszillierenden Anker b, dessen freier Arm durch einen zweiten, um d drehbaren Hebel c mit rundlicher Auflagfläche zur Verschiebung des Angriffspunktes mittels einer Feder e niedergezogen und dadurch der Anker b gehoben wird, sobald die Anziehungskraft des Magnets m unter die Stärke der Federkraft sinkt. Infolge der abgerundeten Angriffsfläche des Hebels c erfolgen die

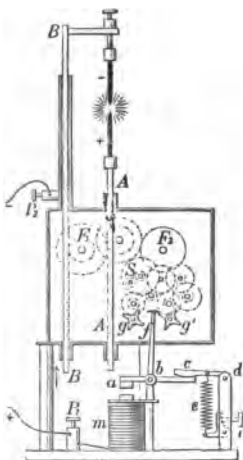


Fig. 175.

Bewegungen des Ankers ohne Stoß. Mit dem Ankerhebel ist der Arm **a f** verbunden, der oberhalb beiderseits eine Nase hat, womit er je nach seiner Stellung die Rotation des einen oder andern Windfanges **g** oder **g'** hemmt und somit das mit dem Federhause F_2 verbundene Räderwerk veranlaßt, sich rechts oder links umzudrehen, wodurch die Kohlenspitzen einander genähert oder von einander entfernt werden. Der positive Strom tritt durch die Polklemme P_1 in den Elektromagnet ein und erregt denselben um so mehr, je größer die Stromstärke ist. Vom Elektromagnet geht der Strom in das Gehäuse und von da in den unteren Kohlenstab. Je nach dem Grade der magnetischen Anziehung wird der Anker **b** dem Magnetpol genähert und dadurch erfolgt die beschriebene Einwirkung auf das Räderwerk und auf die Kohlenstäbchen, so daß letztere bei wachsender Stromstärke sich von einander entfernen und bei abnehmender Stromstärke sich einander nähern müssen.

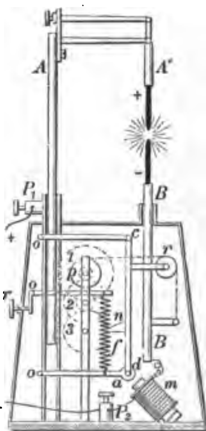


Fig. 176.

Die Serrin-Lampe (Fig. 176) hat nur eine mittels Zahnstange bewegliche obere (positive) Kohle, während die Bewegung der untern (negativen) Kohle mittels einer Parallelführung, sogenannter Balance, durch Einwirkung eines Elektromagnets erfolgt. Die Verbindung des obern Kohlenhalters **A'** mit der Zahnstange **A** ist durch zwei Arme bewirkt, welche mittels Schrauben und eines ihre Enden verbindenden Gelenkstückes gestatten, die obere Kohlenspitze genau in eine Linie mit der untern zu bringen. Mit dem Stativ, worin sich die Zahnstange **A** verschiebt, ist durch die festen Scharniere **a a** die Parallelführung (Balance) **a c d a**

verbunden, woran die Rolle r sitzt, über welche eine feine Gliederkette geht, an welcher der Halter B des unteren Kohlenstiftes hängt. Die Kette ist mit der Rolle p verbunden, um welche sie sich herumwindet. Auf der Achse der Rolle p sitzt das doppelt so große Zahnrad 1, welches in die Zahnstange A des obern Kohlenhalters eingreift. Mit dem Zahnrad 1 sind durch Getriebe die Räder 2 und 3 verbunden, welche in einem festen Ständer eingelagert sind. Am mittelsten Zahnrad 2 sitzt ein Sperrrad, welches das Herausziehen des Kohlenhalters ohne die Bewegung des Räderwerkes gestattet. Das Scharnier d der Balance ist mit einem cylindrischen Anker verbunden, welcher vom Magnet m angezogen werden kann, wobei die Balance niedergehen muß. Bei dem Nachlassen der magnetischen Kraft kommt die Feder f zur Wirkung, welche die Balance emporzieht. Beim Heruntergange der Balance greift der Zahn n in das Rad 3 ein und hemmt das Räderwerk, so daß die Kohlenspitzen ihre Distanz konstant halten; beim Hinaufgange der Balance läßt der Zahn n das Räderwerk frei und durch das Gewicht des obern Kohlenhalters sinkt derselbe, dreht das Rad 1 nebst der Kettenrolle p, so daß gleichzeitig auch der untere Kohlenhalter gehoben wird und beide Kohlenspitzen sich einander nähern. Die Annäherung (Senkung) der obern, positiven Kohle erfolgt aber doppelt so rasch, als die Hebung der negativen. Der Strom tritt durch die Klemme P_1 in das Metallgestell des Apparats und von da in die obere, positive Kohle, von welcher derselbe in die negative Kohle übergeht, deren Halter vom Gestell isoliert ist. Aus dem Halter der negativen Kohle geht der Strom durch eine Spiralfeder in den ebenfalls vom Gestell isolierten Elektromagnet m über und zur Klemme P_2 wiederum in den Stromkreis hinaus. Diese Lampe wird durch Gleichstrom betrieben und ist nur für Einzellicht zu benutzen.

Die Siemens-Halske-Lampe (System Hefner-Alteneck) ist ebenfalls wie die vorige so eingerichtet, daß die

Entfernung der Kohlenspitzen durch die wechselweise Wirkung des Gewichts des obern Kohlenhalters und der Anziehungskraft eines Elektromagnets reguliert wird, nur mit dem Unterschiede, daß die Konstruktion viel einfacher ist und daß der Anker nicht zwei Ruhelagen (die eine in angezogener, die andere in abgefallener Stellung) hat, sondern es wird durch die beim Anzug des Ankers bewirkte Ausschaltung des Elektromagnets aus dem Stromkreise derselbe sofort wieder selbstthätig vom Magnet entfernt, ohne daß der abnehmende Widerstand des Lichtbogens darauf hinzuwirken hat. Hierdurch wird die Wirkung viel präziser und der Lichtbogen konstanter.

Bei diesen drei beschriebenen Lampen wird der Lichtbogen in unveränderter Stellung erhalten und daher sind dies sogenannte Lampen mit konstantem Brennpunkte, die sich besonders für Projektionszwecke eignen. Bei konstanter Spannung im Stromkreise sind diese Lampen vorzüglich zur Parallelschaltung geeignet, jedoch muß ihnen alsdann ein sogenannter Zusatz- oder Beruhigungswiderstand bis zu etwa 1 Ohm vorgeschaltet werden, durch den bei Veränderungen der Lichtbogenlängen die dadurch verursachten Stromschwankungen gemildert werden.

3. Lampen mit Regulierung auf gleichen Widerstand im Lichtbogen. Die erste derartige Lampe und damit auch die erste für Reihenschaltung geeignete Lampe wurde 1878 von Siemens & Halske nach der von Hefner-Alteneck ausgearbeiteten Konstruktion gebaut. Es wurde dadurch die Teilung des elektrischen Lichtes mittels selbstthätiger Lampen ermöglicht und damit der elektrischen Beleuchtung ein Anstoß zu ihrer großartigen Entwickelung gegeben. Die Einrichtung dieser Lampe ist schematisch in Fig. 177 S. 360 dargestellt. In den Stromkreis ist einerseits die aus starkem Drahte gebildete Spule S und anderseits die aus feinem Drahte gebildete Spule S_1 eingeschaltet, von denen die letztere einen größern Widerstand bietet als die erstere. In diesen Spulen steckt der Eisenstab e,

welcher in seiner Mitte durch einen Hebel h mit dem obern Kohlenhalter A verbunden ist, während der untere Kohlenhalter B feststeht.

Der bei P_1 in die Lampe eintretende Strom verzweigt sich in die beiden Spulen, wobei der durch die untere, geringen Widerstand bietende Spule gehende Zweigstrom die Kohlen nach der Austrittsklemme P_2 durchläuft, während der andere Zweigstrom durch die großen Widerstand bietende

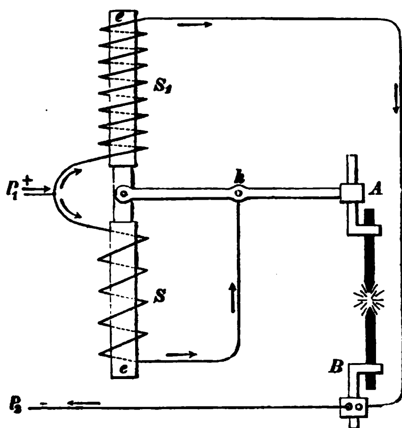


Fig. 177.

obere Spule mit kurzem Schluß außerhalb der Kohlen nach P_2 seinen Weg findet. Sind die Kohlen für die normale Bildung des Lichtbogens zu weit entfernt, so geht bei dem jetzt stattfindenden hohen Widerstande im Stromkreise der stärkste Stromzweig durch die obere, widerstandsstarke Spule S_1, der Eisenkern e wird folglich nach oben gezogen, der Hebel h am hintern Ende gehoben und daher ein Heruntergehen der obern Kohle und somit eine Verringerung des Kohlenabstandes bewirkt. Kommen die Kohlenspitzen

einander zu nahe, so geht der Strom durch die widerstandsschwache Spule S, der Hebel wird gehoben und damit die obere Kohlenspitze emporgerückt, um den Kohlenabstand zu vergrößern.

In der wirklichen Lampe (Fig. 178) ist der obere Kohlenhalter mit einer Zahnstange z verbunden, welche sich vertikal in dem Parallelogramm **baac** bewegen kann, wobei ihre Bewegung durch ein Steigrad r mit Hemmung und Pendel geregelt wird.

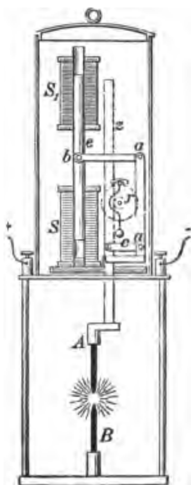


Fig. 178.

Der Strom tritt bei P_1 ein und geht von da durch die Spulen SS_1 nach dem obern Kohlenhalter; die Klemme P_2 steht durch die beiden Stahlstangen mit dem untern Kohlenhalter und der Klemme P_1 in Verbindung. Die Wirkungsweise der Lampe ergiebt sich aus der Beschreibung der Fig. 177.

Wird durch irgend welchen Vorgang im Stromkreise außerhalb der Lampe die Stromstärke verändert, so bringt dies an sich in der Lampe keine Bewegung hervor, weil dabei die Stromstärken in beiden Zweigen um gleichviel ihrer frühern Stärke ab- oder zunehmen, also die Summen ihrer auf den Eisenstab ausgeübten Anziehungen nach wie vor einander ausgleichen, so daß das Gleichgewicht nicht gestört wird. Für die Größe des Widerstandes, auf welchen der Lichtbogen gebracht wird, ist das Verhältnis der Wirkungen der beiden Drahtspulen S und S_1 auf den Eisenstab e maßgebend. Diese Wirkungen werden durch die geeignete Auswahl des Widerstandes und die Zahl der Umwindungen auf den beiden Spulen vorherbestimmt, oder man kann auch mit Rücksicht darauf den Stab S mehr oder weniger in eine der beiden Spulen eintauchen lassen; zu diesem Zweck kann

die obere Spule in eine höhere oder tiefere Stellung gebracht werden.

Diese Differentiallampe wird für Gleichstrom- und für Wechselstrombetrieb eingerichtet, wobei nur ein Unterschied in der Bewickelung der Spulen und in der Länge der Kohlen vorhanden ist. Für Gleichstrombetrieb ist die obere, positive Kohle etwa doppelt so lang oder von doppelt so großem Querschnitt als die untere, für Wechselstrombetrieb sind beide Kohlen gleich lang und dick.

Die Differentiallampe von Brush (Fig. 179—181) ist besonders in Amerika sehr verbreitet. Die untere Kohle B oder die unteren Kohlen, denn es sind meist zwei davon vorhanden, stehen fest. Der obere Kohlenhalter A setzt sich als eine glatte Stange fort, die von einem Ringe d umfaßt wird. Wird dieser Ring seitlich gehoben, so legt er sich infolge seiner Neigung an die leicht hindurchgehende Stange des obern Kohlenhalters an und nimmt folglich diesen mit in die Höhe; wird der Ring wieder gesenkt, so sinkt mit ihm auch der Kohlenhalter, bis der Ring an einen Anschlag sich legt, worauf die Stange des Kohlenhalters durch ihr Gewicht langsam hindurchgleitet. Das Anheben des Ringes geschieht durch den hufeisenförmigen Elektromagnet e m, auf dessen Schenkeln S die Hauptstromspule und die Nebenschlußspule übereinandergewickelt sind. Dieser Elektromagnet kann in der beschriebenen Weise auch auf einen zweiten Kohlenhalter einwirken. Die beiden Wickelungen wirken, wie bei der

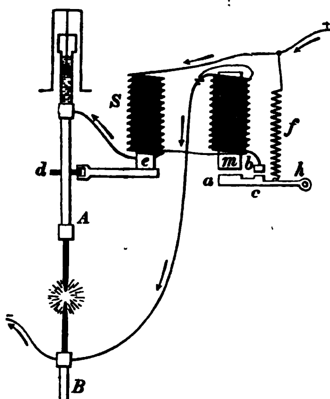


Fig. 179.

vorher beschriebenen Differentiallampe, in entgegengesetzter Weise, indem die Hauptstromspule das Heben des Ringes und somit die Entfernung der Kohlen zu vergrößern, die Nebenschlußbewickelung den Kohlenabstand zu verkleinern sucht. Das Spiel der Lampe ist also gerade so wie bei der Differentiallampe von Siemens & Halske.

Das Nachsinken der positiven Kohle wird durch eine hydraulische Hemmung

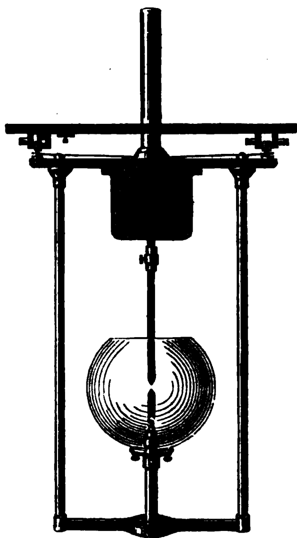


Fig. 180.

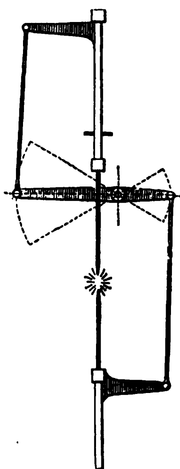


Fig. 181.

moderiert, welche aus einem am Gestell aufgehängten kleinen durchlochten Kolben besteht, der sich im obern hohlen, etwa mit Glycerin gefüllten Teile des Kohlenhalters A befindet. Endlich ist noch eine automatische Ausschaltung für den Fall angebracht, daß die Lampe zufällig versagt. Hierzu dient der erwähnte Elektromagnet m, indem bei Unterbrechung des Hauptstroms durch

die Kohlen der feine Draht der Nebenschließung von einem starken Strome durchlaufen wird, welcher den Magnet so kräftig erregt, daß dieser seinen Anker a anzieht, dadurch den Hebel h hebt und den Kontakt b c schließt, wodurch der Hauptstrom kurz geschlossen wird und seinen Weg in der Pfeilrichtung direkt durch den untern Kohlenhalter B nimmt.

Um für gewisse Zwecke den Lichtbogen in gleicher Höhe, z. B. im Fokus eines Reflektors, zu erhalten, wendet Brush die in Fig. 180 illustrierte Vorrichtung an, wodurch die beiden Kohlen stets gleichzeitig gegeneinandergerückt werden und zwar die obere, positive doppelt so schnell als die untere, negative.

Levers Lampe, ähnlich der Brush-Lampe, wobei der Hauptregulierungsmagnet durch eine Feder ersetzt ist. Fig. 182 zeigt die Anordnung, während aus Fig. 183 oben die Wirkungsweise ersichtlich ist. F F sind die Schenkel eines Elektromagnets, dessen Spiralen einen Nebenschluß von hohem Widerstand um den Bogen bilden. Die Feder D wirkt der Anziehung des Magnets auf den Anker A entgegen. Der obere Kohlenhalter C wird von einer Bremsscheibe B umgeben, welche lose auf einem Vorsprunge des Hebels L ruht, an welchem der Anker befestigt ist. Ist die Scheibe B horizontal, so gleitet der Kohlenhalter durch sein Gewicht frei hindurch; wird sie aber durch die Feder schräg gestellt, so faßt sie den Kohlenhalter und hält ihn fest. Die



Fig. 182.

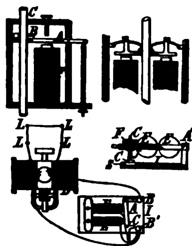


Fig. 183.

Wirkungsweise der Lampe ist folgende: Geht kein Strom hindurch, so hält die Bremse den Halter fest und die beiden Kohlen bleiben entfernt, bis der Stromkreis geschlossen ist, wodurch der Magnet erregt und der Anker niedergezogen wird. Der obere Kohlenhalter wird dann frei und kommt in Kontakt, worauf der Strom einen Weg mit geringem Widerstand findet, der Magnet seine Kraft verliert und den Anker losläßt. Der letztere wird alsdann sofort von der Feder gehoben und hebt die Bremse mit dem obern Kohlenhalter empor, wodurch der Strom hergestellt wird. Die Lampe brennt, bis der wachsende Widerstand des Stromes einen größern Stromteil durch die Magnetspiralen leitet und so dessen Kraft vergrößert; der Anker wird angezogen und die Bremse gelüftet, bis der Kohlenhalter frei wird und sich ein wenig senkt.

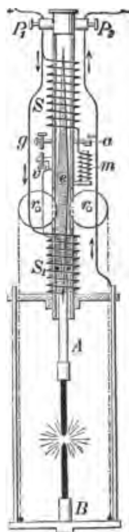


Fig. 184.

Die Schuckertsche Differentiallampe oder Pilsen-Lampe (System Krizik-Piette), erfunden von Franz Krizik und Ludwig Piette in Pilsen, vervollkommnet von S. Schuckert in Nürnberg, beruht auf der Anwendung doppelt konisch geformter Solenoidkerne, wodurch ein kräftigeres Hineinziehen des Kernes in die magnetische Spirale erreicht wird, als wenn der Kern cylindrisch ist. Auf diese Weise kann der Solenoidkern direkt zur Bewegung der Kohlenhalter dienen und das Zwischenräderwerk wird unnötig.

Fig. 184 illustriert schematisch die Einrichtung dieser Lampe. Der doppelt konische Eisenkern e ist mit dem obern Kohlenhalter **A** direkt und mit dem untern Kohlenhalter **B** mittels der über die am Gestell befestigten Rollen **r** geführten Schnüre verbunden, so daß durch die Bewegung des Eisenkerns beide Kohlenhalter gleichzeitig, aber nach entgegen-

gesetzten Richtungen, bewegt werden. Der Eisenkern spielt frei in einem mit dem Lampengestell verbundenen Messingrohre, um welches zwei Solenoide S und S_1 gewunden sind. Das obere, aus starkem, wenig Widerstand bietendem Drahte gewundene Solenoid S ist in den durch die Kohlenhalter gehenden und den Lichtbogen bildenden Hauptstrom eingeschaltet, während das untere, S_1, das aus einer starken und einer dünnen, viel Widerstand bietenden Spirale besteht, mit der letztern einen Nebenschluß bildet.

Um die Lampe bei dem zufälligen unzeitigen Erlöschen sofort automatisch ganz aus dem Stromkreise auszuschalten, ist mit der obern Spirale ein kleiner Elektromagnet m verbunden, der auf einen oszillierenden Anker a wirkt, welcher durch ein Gegengewicht g vom Magnetpole entfernt gehalten wird, so lange nicht die magnetische Anziehung die Gewichtskraft überwindet. Unterhalb des Hebelendes befindet sich in einem von dem Lampengestell isolierten Winkelstück eine Kontaktschraube v, welche mit der untern Doppelspirale S_1 in Verbindung steht. Der bei P_1 eintretende Strom geht durch die obere Spirale S, den Elektromagnet m und den obern Kohlenhalter A, tritt alsdann in den untern Kohlenhalter B über und geht von da nach der Austrittsklemme P_2. Je größer der Lichtbogen wird, um so stärker wird auch der Widerstand in der obern Spirale S und ein um so größerer Teil des Stromes geht durch die untere Spirale S_1, folglich wird dann der Eisenkern e auch um so mehr von der letztern Spirale angezogen und somit auf eine Annäherung der Kohlenspitzen hingewirkt; nur bei normaler Stärke des Lichtbogens ist die Einwirkung der beiden Spiralen auf den Eisenkern gleichgroß.

Fig. 185 stellt die Krizik-Piettesche Differentiallampe mit horizontalen Kohlenstäben dar; bei dieser außerordentlich einfachen Konstruktion ist e der Eisenkern, r r sind Kontaktrollen und S S_1 die beiden Differentialspulen. Die eine Kohle ist am Ende des Rohres e, die andere am Arme d befestigt.

Die Differentiallampe von Pieper (Fig. 186) zeichnet sich durch einfache Einrichtung aus. Die Kohlenhalter sind direkt an zwei Eisenkernen N N befestigt, und werden mittels einer über die Rolle G gelegten Schnur

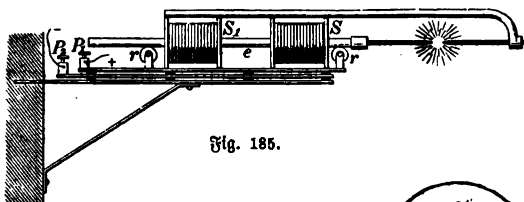


Fig. 185.

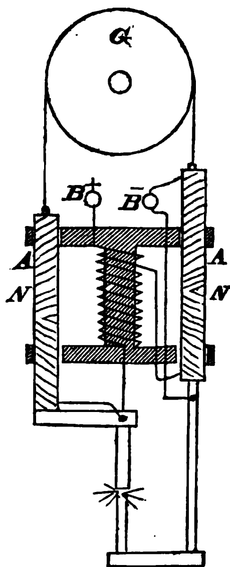


Fig. 186.

geführt. Von diesen Eisenkernen ist der eine zum Durchfluß des Hauptstromes mit starkem Draht, der andere mit feinem Draht für Nebenschluß bewickelt. Diese Bewickelungen sind zur Hälfte des Kernes in der einen, zur andern Hälfte in der entgegengesetzten Richtung geführt, um eine neutralisierende Wirkung hervorzurufen. Die Eisenkerne bewegen sich frei durch Öffnungen A A, welche in den plattenförmigen Polschuhen eines Differentialelektromagnets E angebracht sind. Die Schaltung der Kernbewickelung mit Bezug auf diesen Elektromagnet sind aus der schematischen Abbildung ersichtlich, und zwar ist jede von dessen Bewickelungen in Reihe mit der Bewickelung der betreffenden Kernspule geschaltet. Wird die Lampe eingeschaltet, wenn die Kohlen einander nicht berühren, so wird der den untern Kohlenhalter

tragende Kern gehoben, wodurch der Hauptstromkreis geschlossen wird. Hierauf kommt die Differentialbewickelung des Magnets E zur Wirkung und dessen Hauptstromspule tritt in Thätigkeit. Die Bewegung der Kerne soll, bei dieser Einrichtung, den geringsten Stromschwankungen folgen und somit die Lampe sehr genau regulieren.

4. **Lampen mit Regulierung auf gleiche Spannung.** Diese sogenannten **Nebenschlußlampen** erfordern Speisung mit konstantem Strom, wobei ihr Reguliermechanismus konstante Spannung zwischen den Kohlen herzustellen sucht. Eine solche Nebenschlußlampe wird erhalten, wenn man in einer Differentiallampe die Hauptstromspule wegläßt. Die Wirkung des Nebenschlußmagnets ist dann, unter sonst gleichen Umständen, viel kräftiger, als in der Differentiallampe, in der nur die Differenz der magnetischen Kräfte zur Wirkung kommt. Die Differentiallampe verlangt deshalb einen feiner ausgeführten Mechanismus als die Nebenschlußlampe, daher ist die letztere billiger herzustellen, jedoch ist die Nebenschlußlampe nur für Parallelschaltung geeignet, während die Differentiallampe sich vorzüglich für Reihenschaltung anwenden läßt. Hierher gehören:

Die **Serrin-Lontinsche Nebenschlußlampe** (Fig. 187) ist von dem Amerikaner **Lontin** durch einige Modifikationen aus der **Serrinschen** Lampe (Fig. 176 auf S. 357) hergestellt worden. Der durch die Klemme P_1 in die Lampe eintretende Strom verzweigt einesteils nach den Kohlen, andernteils nach dem Elektromagnet m, worauf beide Zweige in der Austrittsklemme P_2 sich wieder vereinigen. Sind zuerst bei Eintritt des Stromes die Kohlen außer Kontakt, so geht der ganze Strom nach dem Elektromagnet, welcher seinen unterhalb befindlichen Anker anzieht, dadurch das Parallelogramm **o c d a** hebt, den Sperrzahn **n** ausrückt und das Räderwerk für den Antrieb durch das Gewicht des obern Kohlenhalters A freigiebt. Hierdurch sinkt der obere Kohlenhalter, während gleichzeitig der untere

steigt, und zwar erfolgt die Bewegung im Verhältnis 2 : 1, und die Kohlenspitzen gehen zusammen. Sobald ihr Kontakt eingetreten ist, verzweigt sich der Strom zum größten Teil durch die Kohlen und der geschwächte Elektromagnet giebt seinen Anker frei; hierdurch sinkt das Parallelogramm mit

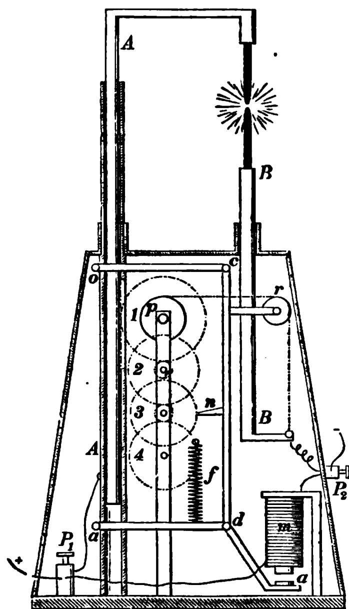


Fig. 187.

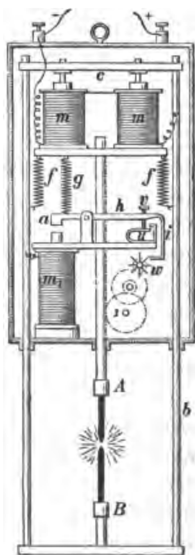


Fig. 188.

dem untern Kohlenhalter, der Sperrzahn n hemmt die Bewegung des Räderwerks und damit auch die des obern Kohlenhalters, die Kohlen gehen aus einander und erzeugen den Lichtbogen. Sobald durch den Abbrand die Distanz der Kohlenspitzen zu weit und damit der Widerstand für den

Strom zu groß wird, findet dieser wieder seinen Hauptweg durch den Elektromagnet, dieser zieht den Anker an und das anfängliche Spiel wiederholt sich. In ähnlicher Weise lassen sich auch die Crompton-Lampe und die Bürgin-Lampe abändern.

Die Gramme-Lampe (Fig. 188 S. 369) hat einen in den Hauptstrom eingeschalteten Magnet m und einen im Zweigstrom befindlichen Magnet m_1 von größerem Widerstande. Der erstere wirkt auf den isoliert im Gehäuse der Lampe verschiebbaren und an den Federn ff angehängten Rahmen bb des untern Kohlenhalters B, indem er denselben durch Anziehung des obern Rahmenquerstückes c herunterschiebt; letzterer wirkt auf einen oszillierenden Hebel h, der mit dem Anker a und einer gegen den Windfang w sich legenden Stange i verbunden ist. Läßt der Magnet m_1 den Anker a frei, so wird derselbe durch die Feder g gehoben und der Windflügel mit dem Räderwerke, folglich auch der durch Zahnstange damit verbundene obere Kohlenhalter A gehemmt. Zieht der Magnet m_1 den Anker a an, so wird das Räderwerk, zugleich aber auch der Kontakt u v am Hebelende aufgehoben und der Anker sofort wieder frei, so daß der Ankerhebel den Windfang immer nur um einen Flügel weiter gehen läßt, wodurch eine sehr genaue Einstellung der Kohlen erfolgt. Sobald die Kohlen zur Berührung kommen, geht der Hauptteil des Stromes durch m und der Rahmen des untern Kohlenhalters wird durch Anziehung von c herabgerückt, so daß die Kohlen in Lichtbogenweite sich einstellen.

Die bisher beschriebenen Lampen können zwar für die Teilung des Lichtes Verwendung finden, jedoch kann man bei Einschaltung mehrerer Lampen in einen Stromkreis kein vollständig gleichförmiges Licht erzielen, indem die Anziehung der Elektromagnete mit der Stromstärke sich verändert und daher durch die Vorgänge im äußern Stromkreise, wie solche durch die Speisung mehrerer Lampen durch ein und denselben Strom leicht herbeigeführt werden, störend auf den

Reguliermechanismus der einzelnen Lampen eingewirkt wird. Hiervon sind die folgenden Differentiallampen frei, indem ihre Regulierung nur von den Veränderungen innerhalb ihres eigenen Stromkreises abhängig ist.

Die Flachdecklampe von Siemens & Halske zeichnet sich unter den Nebenschlußlampen durch niedrigen Oberbau aus, wodurch der Lichtpunkt mehr an die Decke gebracht wird und somit die Lampe auch zur Aufhängung in niedrigen Räumen geeignet ist. Nach Fig. 189 arbeitet ein liegender Elektromagnet mit Selbstunterbrechung und versetzt dadurch seinen Anker in Schwingungen, sobald eine bestimmte Spannung überschritten wird. Mit dem Anker ist eine Stoßklinke verbunden, die mittels eines Sperrrades eine in der linken Stange des Rahmens angebrachte Schraubenspindel dreht. Hierdurch wird ein abhebbares Mutterstück, das den oberen, beweglichen Kohlenhalter mit der Spindel kuppelt, nach unten geschraubt, wodurch der obere Kohlenhalter gesenkt wird. Soll der obere Kohlenhalter beim Einsetzen neuer Kohlen wieder nach oben geschoben werden, so wird das mit einem Hebel versehene Mutterstück außer Eingriff mit der Spindel gebracht. Ein Hauptstrommagnet bildet den Bogen, indem er das Sperrrad emporzieht.

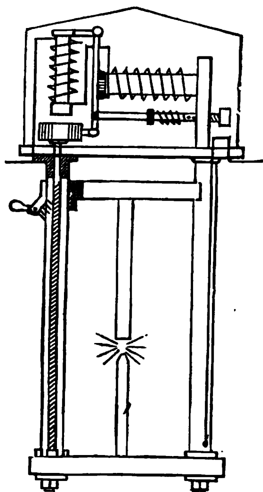


Fig. 189.

Die Bandlampe von Siemens & Halske (Fig. 190 S. 372). In dieser Nebenschlußlampe ist kein Hauptstrommagnet vorhanden, auch sind Kontakte, wie solche die

Selbstunterbrechung erfordert, vermieden, weil sie durch die Funkenbildung leicht schadhaft werden und zu Störungen Anlaß geben. Ein an einer horizontalen Achse drehbarer, schräg aufwärts stehender Rahmen trägt an seinem oberen Ende den Anker des Elektromagnets und eine Trommel, welche durch eine Ankerhemmung an fortdauernder Umdrehung gehindert ist. Auf diese Trommel ist ein Kupferband gewickelt, das den schweren obern Kohlenhalter trägt und ihm gleichzeitig den Strom zuführt. Der Rahmen wird durch eine Spiralfeder in seiner höchsten Stellung erhalten. Wird die Lampe eingeschaltet, so zieht der Elektromagnet den Rahmen kräftig nach unten, die Ankerhemmung wird dadurch frei und der obere Kohlenhalter sinkt durch sein Gewicht mit Abwickelung des Kupferbandes so lange, bis die Kohlen sich berühren, worauf der Magnet stromlos wird, den Anker losläßt und dieses durch die Spiralfeder wieder emporgezogen wird, so daß der Lichtbogen sich bildet. Eine im Innern der Trommel angebrachte Feder bewirkt, daß das Kupferband wieder um die Trommel gewickelt wird, wenn man den obern Kohlenhalter zum Einsetzen neuer Kohlen in die Höhe schiebt.



Fig. 190.

165. Die Einrichtung und Wirkungsweise der Glühlampen. — Die Glühlampen bestehen in der Hauptsache aus einem möglichst luftleer gemachten, luftdicht geschlossenen Glasgehäuse, worin ein in geeigneter Weise zubereiteter schleifen- oder bügelförmiger Kohlenfaden sich befindet, dessen Enden mit Platindrähten verbunden sind, die in das Glas eingeschmolzen und nach außen geführt sind, wo sie durch eine Kontaktvorrichtung mit der Stromleitung in Verbindung gesetzt werden können. Durch den eingeführten elektrischen

Strom wird der Kohlenfaden zum Glühen gebracht. Wegen der Luftleere des Raumes ist die Verbrennung des glühenden Kohlenfadens gehindert und die Lampe kann bei guter Einrichtung und entsprechend geregelter Stromzuführung tausend und mehr Stunden brennen, bis durch die allmählich stattfindende Abnutzung des Kohlenfadens ihr Licht so abgeschwächt wird, daß man sie durch eine neue Lampe ersetzen muß.

In Fig. 191 sind vier der gebräuchlichen Formen der Glühlampe mit verschiedenartig gebogenen Kohlenfäden dargestellt.

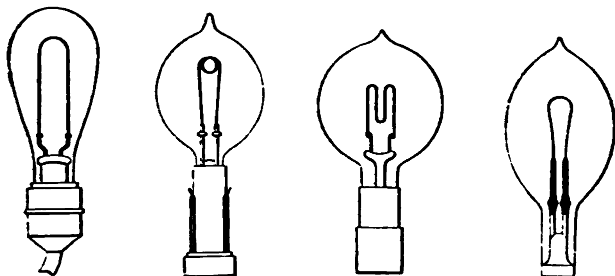


Fig. 191.

Der Kohlenfaden wird aus Pflanzenfasern oder künstlich zubereiteter homogener Cellulose hergestellt und nach seiner in Muffeln bewirkten Verkohlung durch Glühen in flüchtigen Kohlenwasserstoffen noch mit fein zerteilter Kohle überzogen.

Der Widerstand der Glühlampen nimmt mit der Temperaturerhöhung des glühenden Kohlenfadens ab und ihre Lichtstärke unterliegt schon bei geringen Stromschwankungen sehr bemerklichen Veränderungen.

Die Anforderungen, die man an eine gute Glühlampe zu stellen hat, sind: möglichst lange Haltbarkeit oder Lebensdauer, Gleichmäßigkeit der Lampen gleicher Sorte hinsichtlich

der Betriebsbedingungen und Leuchtkraft und möglichst geringer Energieverbrauch für ihre normale Lichtstärke. Im Betrieb darf die Lampe nur bis zu der normalen Stromstärke beansprucht werden, weil sonst die Lampe sich überhitzt und ihre Lebensdauer verkürzt wird.

Die Leuchtkraft einer Glühlampe ist von der Größe der Oberfläche und der Beschaffenheit des Kohlenfadens, sowie von dessen Glühtemperatur abhängig. Bei gleichem Kohlenmaterial und gegebener Glühtemperatur giebt jeder Quadratmillimeter Oberfläche des Kohlenfadens eine bestimmte Lichtstärke ab, gleichviel ob der Faden dick oder dünn, kurz oder lang ist. Die Ausstrahlung der vom elektrischen Strom in jedem Augenblick erzeugten Wärme ist unter denselben Voraussetzungen der Oberfläche proportional. Soll eine Glühlampe von bestimmter Leuchtkraft (Kerzenzahl) für eine höhere Spannung e hergestellt werden, so muß der Widerstand w des Kohlenfadens proportional dem Quadrat der Spannung erhöht werden, um die Energie, die gleich $\frac{e^2}{w}$ ist, konstant zu erhalten, die Oberfläche des Fadens muß aber dieselbe Größe haben, wie vorher. Hierdurch wird eine bedeutende Querschnittverkleinerung des Kohlenfadens bedingt. Die erforderliche mechanische Festigkeit des Fadens wird dadurch aber entsprechend vermindert, so daß derselbe sehr bald der Erhitzung und den Erschütterungen nicht mehr genügend standhält. Diese Grenze wird bei Lampen von geringer Kerzenzahl früher erreicht als bei Lampen von starker Leuchtkraft. Für Lampen von 16 Kerzen gilt als größte zulässige Spannung zurzeit 150 Volt; in der Praxis geht man aber gewöhnlich nur bis 110—120 Volt. Lampen für geringe Spannung besitzen daher eine längere Lebensdauer als Lampen mit hoher Spannung, oder sie können für gleiche Lebensdauer stärker beansprucht werden. So werden von Siemens & Halske Glühlampen für Hintereinanderschaltung zu 11 Ampère und 20 Volt bei einer Ökonomie

von 2.25 Volt-Ampère pro Normalkerze hergestellt, wogegen 120 Volt-Lampen etwa 3.5 Volt-Ampère pro Normalkerze verbrauchen.

Die Forderung einer hohen Ökonomie steht in gewissem Sinne in Widerspruch mit der Forderung einer großen Lebensdauer, weil mit Steigerung der Stromstärke bei derselben Glühlampe das Verhältnis der erzeugten Lichtstärke zum Energieverbrauch wächst, die Lebensdauer der Lampe aber infolge der stärkeren Beanspruchung sinkt. Von zwei verschiedenen Lampen kommt derjenigen der Vorzug zu, die bei gleicher Temperatur des Kohlenfadens, das heißt: bei gleicher Beanspruchung, die höhere Ökonomie besitzt, und ebenso ist von zwei verschiedenen Lampen von gleicher Lebensdauer diejenige vorzuziehen, welche die höhere Temperatur verträgt und folglich auch wiederum die höhere Ökonomie für sich hat.

Die Glühlampen werden gewöhnlich in Parallelschaltung betrieben, weil alsdann bei konstanter Spannung zwischen den Hauptleitungen jede Lampe für sich ein- und ausgeschaltet werden kann. Konstante Spannung bei veränderlicher Stromstärke läßt sich aber leicht mit Nebenschluß- oder Compounddynamos erhalten.

Die Parallelschaltung der Glühlampen hat noch den Vorteil, daß ihre Anzahl unbegrenzt vermehrt werden kann, sobald die Hauptleitungen für die erforderliche Verstärkung des Stromes eingerichtet sind.

Bezüglich der Hintereinanderschaltung ist aber die Spannungsverstärkung sehr beschränkt und von der Maximalspannung der Maschine abhängig. Auch müssen dabei die Glühlampen mit einer selbstthätigen Kurzschlußvorrichtung versehen sein. Eine derartige Kurzschlußvorrichtung stellt Bernstein durch einen zwischen die Lampenklemmen eingefügten Nebenschluß aus einer Mischung von Quecksilberoxyd und Kohlenpulver her. Im normalen Betrieb der Lampe geht nur ein sehr geringer Strom durch diesen Nebenschluß. Sobald aber der Kohlenfaden zufällig bricht,

wächst sofort der durch diesen Nebenschluß gehende Strom so stark an, daß durch die erzeugte Wärme aus der Mischung metallisches Quecksilber ausgeschieden wird, welches zwischen den Lampenklemmen eine gut leitende Verbindung herstellt.

Fünfunddreißigstes Kapitel.

Die elektrischen Beleuchtungsanlagen.

166. **Die Aus- und Umschalter.** — Die Ausschalter bezw. Einschalter dienen zur Unterbrechung bezw. Herstellung des Stromes in einer Leitung, während die Umschalter zur Änderung der Stromrichtung benutzt werden. Bei beiden Apparaten muß zwischen den beweglichen und festen Teilen ein möglichst guter Kontakt bestehen, damit der Strom seinen Weg ohne Überwindung eines Widerstandes nehmen kann. Bei den Ausschaltern muß die Stromunterbrechung so rasch erfolgen, daß der sich bildende Lichtbogen sofort infolge des Auseinanderreißens der Kontakte wieder unterbrochen wird und selbst bei den stärksten Strömen kein Verbrennen der Kontakte eintreten kann. Die Kontakte der Ausschalter werden deshalb meist durch die schnellende Bewegung vorher mittels eines Hebels gespannter Spiralfedern auseinandergerissen. Es kommen auch selbstthätige Ausschalter zur Anwendung. Dieselben werden bei parallel geschalteten Dynamomaschinen benutzt, indem bei denselben es vorkommen kann, daß die eine dieser Maschinen infolge zufällig eintretender Verminderung ihrer Umdrehungsgeschwindigkeit, anstatt Strom zu erzeugen, den Strom der anderen Maschinen in sich aufnimmt, wodurch die Maschine beschädigt werden kann, weshalb dieselbe sofort ausgeschaltet werden muß, was durch den automatischen Maschinenausschalter bewirkt wird, der mit einer elektromagnetischen Auslösevorrichtung bewirkt wird.

Die Umschalter sind meist auf Drehbewegung eingerichtet, wobei der bewegliche Kontakt einen festen Kontakt immer erst dann verläßt, wenn er mit dem nächsten festen Kontakt bereits wieder Stromschluß nach einer andern Richtung hin hergestellt hat, so daß überhaupt keine Stromunterbrechung eintreten kann.

Für größere Maschinenanlagen mit verschiedenen Stromkreisen und verschiedenen Lichtmaschinen ist es nötig, jeden Maschinenstromkreis mit jedem Lampenstromkreise beliebig verbinden zu können. Diesen Zweck erfüllt der Generalumschalter, der aus einem System rechtwinkelig isoliert sich überkreuzender Kupferschienen besteht, welche an ihren Überkreuzungspunkten durch einen zweckgemäß eingerichteten Schlüssel verbunden werden können.

Auch für Akkumulatorenbatterien sind selbstthätige Ausschalter zu benutzen, welche beim Laden den gelegentlich zu schwach werdenden Maschinenstrom sofort unterbrechen, um den Rückstrom aus der Batterie in die Maschine zu verhüten, und welche anderseits beim Entladen der Batterie ein zu starkes, für die Batterie schädliches Anwachsen des Entladestromes verhindern.

Ferner werden für den Betrieb der in Lichtanlagen benutzten Akkumulatorenbatterien sogenannte Zellenschalter (Fig. 192 S. 378) gebraucht, mittels deren die Spannung im Lichtstromkreise durch entsprechendes Ab- oder Zuschalten von Akkumulatorzellen reguliert wird. Als Einfachzellenschalter gestatten diese Apparate, daß während des Ladens der Batterie gleichzeitig der Strom in das äußere Leitungsnetz geschickt werden kann, als Doppelzellenschalter gewähren sie die Möglichkeit, innerhalb der bestimmten Grenzen die Akkumulatoren mit der geeigneten Spannung zu laden und gleichzeitig das Leitungsnetz mit einer anderen Spannung zu speisen.

Die Zellenschalter werden für Handbetrieb und selbstthätigen Betrieb gebaut; die selbstthätigen regulieren die geforderte Spannung mittels zweier Elektromagnetanker,

die mit Sperrklinken versehen sind, welche bei Spannungsänderung in die Zähne eines Rades oder einer Zahnstange eingreifen. Hierdurch werden die Kontakte des Zellenschalters verschoben, da entweder die Klinken oder der

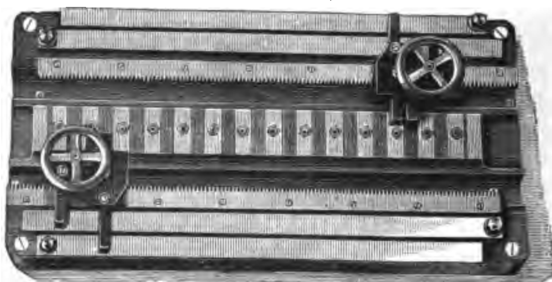


Fig. 192.

gezahnte Teil mittels eines kleinen Elektromotors oder mittels Betriebs durch eine vorhandene Transmission in steter Bewegung erhalten werden. Ein Doppelzellenschalter für Handbetrieb ist in Fig. 192 dargestellt.

167. **Widerstände.** — Die Widerstände dienen zur Regulierung des Betriebes elektrischer Anlagen, indem dadurch die Stromstärke auf bequeme Weise zweckgemäß verändert werden kann. So wird in Lichtanlagen eine ausgeschaltete Bogenlampe durch einen Ersatzwiderstand von entsprechender Größe ersetzt, damit die übrigen Lampen nicht mehr Strom erhalten, als für ihren regelrechten Betrieb nötig ist. Werden von einer Maschine mit konstanter Spannung Bogenlampen in Parallelschaltung betrieben, so ist jede Lampe oder Lampengruppe mit einem Zusatzwiderstand versehen, welcher bei Veränderung der Lichtbogenlänge die dadurch hervorgerufenen Schwankungen des Stromes dämpft. Nebenschlußmaschinen, sowie Gleichspannungsmaschinen (d. h. Maschinen mit gemischter Be-

wickelung oder Compoundmaschinen) sind mit einem Regulierwiderstande zu versehen, der in die Nebenschlußbewickelung des Elektromagnets eingeschaltet ist und zum genauen Einregulieren der Spannung beim Anlassen der Maschine dient, um die Erhitzung der Nebenschlußbewickelung des Magnets zu verhindern, wodurch dessen Kraft geschwächt werden würde. Ferner wird der Regulierwiderstand aber auch noch bei zufällig vorkommenden Geschwindigkeitsänderungen der Maschine benutzt, um deren Klemmenspannung konstant zu erhalten.

Die Ersatz- und Zusatzwiderstände bestehen aus geradlinig ausgespannten Spiralen von verzinktem Eisendraht oder Nickelindraht. Die Regulierwiderstände sind für stärkere Ströme aus Drahtgaze hergestellt, die über Rahmen gewickelt ist. Die Einstellung des Widerstandes geschieht mittels einer über Kontaktknöpfe gleitenden Kurbel. Das Gehäuse der Widerstände besteht aus durchlochtem Blech, damit die Luft durchziehen und die erzeugte Wärme aufnehmen kann.

168. **Die Sicherungen.** — Die Sicherungen dienen dazu, das Glühendwerden der Leitungen bei zufällig zu stark ansteigendem Strom zu verhüten. Besonders ist dies bei dicht nebeneinander liegenden Drähten nötig, durch die der Strom mit starker Spannung geführt ist, indem hier infolge einer Beschädigung der Isolation Kurzschluß eintreten kann. Diese Sicherungen bestehen aus kurzen Stücken eines leicht schmelzbaren Metalls, meist Blei, welches an den zu sichernden Stellen in die Leitung eingeschaltet ist. Bei normaler Stärke geht der Strom durch dieses Metall hindurch; der Querschnitt dieses Metalls ist aber so bemessen, daß bei einem gewissen Ansteigen des Stromes dasselbe sich bis zum Schmelzen erhitzt und somit die Leitung an der betreffenden Stelle unterbrochen wird.

Außerdem sind noch Sicherungen gegen Blitzschlag für die durch die Luft geführten Leitungen nötig; dieselben bestehen aus zwei nahe gegen einander gestellten, und somit durch eine Luftschicht von einander isolierten Metallplatten,

die an den gegeneinandergekehrten Seiten mit vielen scharfen Kanten oder Spitzen versehen sind. Die eine dieser Platten ist mit der Stromleitung, die andere mit der Erde verbunden.

169. **Elektrizitätsverteilung.** — Bei der Parallelschaltung sind die Lampen von einander unabhängig und der Betrieb erfordert nur die Einhaltung einer Spannung von höchstens 120 Volt. Die Lampen L (Fig. 193), Glühlampen sowohl wie Bogenlampen, werden zwischen zwei parallelen starken, für den vollen Strom genügenden Querschnitt bietenden

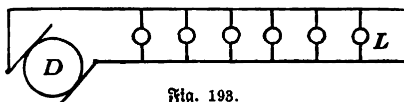


Fig. 193.

Leitungen eingeschaltet, die mit den Klemmen der Dynamomaschine D verbunden sind. Die Klemmenspannung der Maschine muß der höchsten Spannung der angewendeten Lampenart entsprechen; die Stromstärke muß der Lampenzahl entsprechend sein. Sind also beispielsweise 300 Glühlampen von je 65 Volt Spannung und 0.8 Ampère Stromstärke von einer Dynamomaschine zu speisen, so muß diese mit mindestens 65 Volt Klemmenspannung arbeiten und einen Strom von $0.8 \times 300 = 240$ Ampère liefern. Es ergiebt dies für die Maschine eine Leistung von mindestens $240 \times 300 = 7200$ Volt-Ampère oder Watt, was einer mechanischen Arbeitsleistung von etwa 11 Pferdestärken entspricht.

Werden in ein solches Parallelschaltungssystem Bogenlampen mit eingeschaltet, so müssen dieselben, da ihre Betriebsspannung etwa nur der Hälfte von der einer jener Glühlampen entspricht, einen genügenden Zusatzwiderstand erhalten. Vorteilhafter ist es in solchem Falle, zwei Bogenlampen nebeneinander in die Parallelschaltung einzufügen, um an Zusatzwiderstand zu sparen und nicht unnötig Energie auf-

zuwenden. Aber auch in diesem Falle ist für die Bogenlampen ein gewisser Zusatzwiderstand nötig, damit dieselben nicht bei Berührung ihrer Kohlen Kurzschluß bilden, demzufolge zu starken Strom durchgehen lassen und diesen den anderen Lampen entziehen, so daß diese nicht das gehörige Licht geben.

Befinden sich die Lampen beiderseits einer von der Maschine ausgehenden Richtung, so wird die in Fig. 194

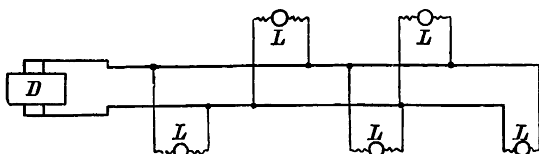


Fig. 194.

angegebene Anordnung der Zweigleitungen stattfinden. Jede der hier angenommenen Bogenlampen ist mit dem früher erwähnten Zusatzwiderstand versehen.

Sind die Bogenlampen nach verschiedenen Seiten hin auf größere Entfernungen zerstreut, so wird die in Fig. 195 S.382 dargestellte Anordnung der sogenannten Gegenschaltung anstatt der gewöhnlichen Parallelschaltung in Anwendung gebracht. Diese Gegenführung hat einen viel geringeren Querschnitt als die Hauptleitung.

Zum Betrieb des Parallelschaltungssystems werden Nebenschlußmaschinen oder Gleichspannungsmaschinen mit gemischter Bewickelung (sogenannte Compoundmaschinen) benutzt, die mit Regulierwiderständen im Nebenschluß versehen sind.

In technischer Beziehung hat das Gleichstrom-Zweileitersystem mit überall gleicher Spannung als die vollkommenste Art der Leitungsanordnung einer elektrischen Zentralanlage für Parallelschaltung zu gelten. Bei ausgedehnten Anlagen stellen sich aber dessen Kosten wegen der

dazu nötigen großen Leitungsquerschnitte zu hoch, weshalb alsdann andere Anordnungen benutzt werden, so die Hintereinanderschaltung von Gruppen, die Mehrleitersysteme, die Wechselstromtransformatoren und andere Systeme, in denen eine entsprechend höhere Spannung zur Anwendung kommt.

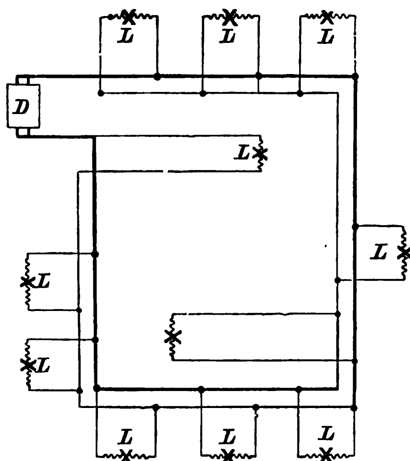
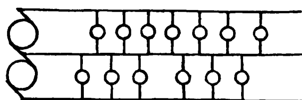


Fig. 195.

Die Mehrleitersysteme bestehen aus der Vereinigung mehrerer Zweileitersysteme. Auf diese Weise ist das von Edison zuerst angewendete Dreileitersystem und das von Hopkinson, sowie insbesondere von der Firma Siemens & Halske ausgebildete Fünfleitersystem entstanden.


Fig. 196.

Das Dreileitersystem (Fig. 196) beruht im Prinzip darauf, daß die Lampen des Stromverteilungsnetzes in zwei

möglichst gleichen Gruppen hintereinander geschaltet sind, wobei zwischen diesen beiden einzeln unter sich parallel geschalteten Gruppen eine Mittelleitung zum Spannungsausgleich vorhanden ist. Diese Mittelleitung oder neutrale Leitung ist praktisch als stromlos zu betrachten und kann daher von sehr geringem Querschnitt sein. Im allgemeinen ist bei dieser Anordnung nur der vierte Teil an Leitungsmaterial im Vergleich zur gewöhnlichen Parallelschaltung unter sonst gleichen Umständen nötig. Der Strom wird von zwei hintereinander geschalteten Gleichspannungsmaschinen (mit Nebenschluß- oder gemischter Bewickelung) geliefert.

Sind in diesem System die beiden Lampengruppen nicht immer bezüglich des Stromverbrauchs gleichwertig, indem dieselben ungleich ein- und ausgeschaltet werden, so muß die Mittelleitung den Stromausgleich bewirken und daher entsprechenden stärkeren Querschnitt erhalten, damit sie den von der stärkeren Lampengruppe zurückkehrenden Stromüberschuß nach den Maschinen führt, indem nur ein Teil dieses Stromes durch die schwächere Lampengruppe geht. Der Aufwand an Leitungsmaterial ist daher in diesem Falle etwa um die Hälfte größer als im vorigen Falle, d. h. etwa $^3/_8$ im Vergleich zur gewöhnlichen Parallelschaltung.

Unter gewissen Umständen kann der Betrieb des Dreileitersystems auch mittels einer Dynamomaschine erfolgen, die alsdann selbstverständlich doppelt so stark als bei Anwendung von zwei Dynamomaschinen sein muß.

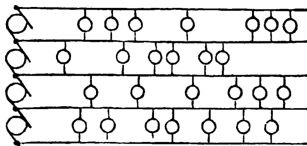


Fig. 197.

Das Fünfleitersystem (Fig. 197) besteht seiner Anordnung nach aus zwei hintereinander geschalteten Dreileitersystemen. Hierbei kann die Stromlieferung von vier gleichstarken, hintereinander geschalteten Dynamomaschinen, oder auch von einer einzigen, viermal so starken

Dynamomaschine besorgt werden. Die letztere Anordnung wird man dann benutzen, wenn die Maschinenstation weit ab vom Beleuchtungszentrum liegt, indem man alsdann den Strom durch das Zweileitersystem zuführt und durch das Fünfleitersystem verteilt. Betrachtet man überhaupt ein n Leitersystem, so besteht im Leitungsnetz jede Linie aus n Leitern und es sind bestimmte Punkte des Netzes mit der Stromquelle durch Zuleitungen (Speiseleitungen oder Feeders nach englischem Ausdruck) verbunden. Ist der Stromverbrauch in den n—1 Abteilungen des Netzes nicht ganz gleich und sind n—1 stromliefernde Maschinen vorhanden, so sind diese verschieden stark beansprucht. Ist aber nur eine stromliefernde Maschine vorhanden, deren Strom durch zwei Zuleitungen den beiden Außenleitern des Netzes zugeführt wird, so geht durch jede Abteilung gleich viel Strom, weshalb bei ungleicher Belastung dieser Abteilungen an den Einmündungsstellen der Zuleitungen selbstthätige Widerstände vorhanden sein müssen, welche die Stromstärke entsprechend der in jeder Abteilung brennenden Lampenzahl regulieren, wodurch ein entsprechender Energieverlust herbeigeführt wird.

Um die Regulierung noch zu vervollkommnen, hat die Firma Siemens & Halske zum Ausgleich größerer Spannungsunterschiede mit dem Fünfleitersystem Akkumulatoren in Verbindung gebracht, deren Aufgabe darin besteht, plötzlich auftretende starke Spannungsansteigungen oder Spannungsabfälle sofort durch Stromaufnahme oder Stromabgabe auszugleichen. Es ist dazu erforderlich, daß diese Akkumulatoren einen geringen inneren Widerstand haben und die nötige Empfindlichkeit besitzen. Außerdem sind aber auch noch Regulierwiderstände vorhanden, welche die länger andauernden Spannungsunterschiede in den verschiedenen Teilen des Systems durch selbstthätiges Ein- und Ausschalten ausgleichen.

170. Elektrizitätsverteilung mittels Akkumulatoren. — Die Akkumulatoren dienen teils zur gleichmäßigen Verteilung des Elektrizitätsstromes im Leitungsnetze, teils zum zeitweisen

Ersatz der Dynamomaschinen, an deren Stelle sie nach erfolgter Ladung die Stromlieferung übernehmen. Im letzteren Falle ist die Anwendung der Akkumulatoren von ökonomischer Wichtigkeit. Die Maschinenanlage ist dann so berechnet, daß sie in etwa 16—20 Stunden die elektrische Energiemenge zu liefern vermag, die Tag und Nacht hindurch im Leitungsnetze verbraucht wird; die somit stündlich vom Elektrizitätswerk gelieferte Strommenge ist daher geringer, als die bei dem Maximalverbrauch benötigte, sie ist aber entsprechend größer, als der stündliche Durchschnitt an Strombedarf. In den einzelnen Verteilungsmittelpunkten sind Akkumulatorenbatterien aufgestellt, welche während der Tageshelle von dem Elektrizitätswerke aus geladen werden,

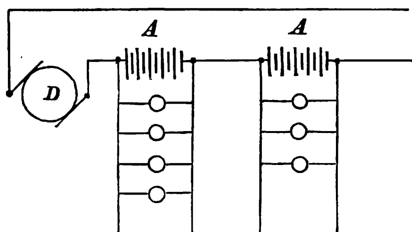


Fig. 198.

um alsdann in den Abendstunden die Stromlieferung des Elektrizitätswerkes für die Lampen zu unterstützen und in den Nachmitternachts- und Frühmorgenstunden den Betrieb der Lampen allein zu übernehmen. Es wird dadurch an Anlagekapital für die Maschinenstation bedeutend gespart und an Betriebssicherheit gewonnen. Bei der in Fig. 198 dargestellten Anordnung von Akkumulatoren, bei der man die parallel geschalteten und mit je einer Akkumulatorbatterie versehenen Lampengruppen beliebig vermehrt sich denken kann, haben die Akkumulatorbatterien A den Zweck, die Stromabgabe der Dynamomaschine D an die Lampen zu

regeln, indem diese Batterien je nach der Anzahl der in jede Gruppe eingeschalteten Lampen entweder Strom aufnehmen oder Strom abgeben, so daß die Spannung in den einzelnen Parallelschaltungsgruppen immer konstant erhalten wird. Es sind hierzu aber noch Reguliervorrichtungen nötig, indem die Klemmenspannung der Akkumulatoren mit fortschreitender Entladung abnimmt.

171. **Regulierung bei dem Zweileitersystem und den Mehrleitersystemen mit Gleichstrombetrieb.** — Bei dem Zweileitersystem werden bei größerer Ausdehnung derselben die Schwerpunkte des Netzes durch Zuleitungen oder Speiseleitungen mit den Hauptleitungen des Elektrizitätswerkes (der Zentrale) direkt verbunden, ohne daß diese Zuleitungen unterwegs Strom abzugeben haben. Um an Kosten zu sparen werden die Querschnitte dieser Zuleitungen möglichst knapp gehalten und somit findet ein größerer Spannungsabfall in denselben statt. Da dieser Spannungsabfall von der Stromstärke abhängig ist, so muß eine zweckmäßige Regulierung der Spannung am Ende jeder dieser Zuleitungen stattfinden, damit daselbst die Spannung immer konstant erhalten wird. Um diese Regulierung in ausreichender und rationeller Weise zu bewirken, ist von Lahmeyer die Fernleitungsdynamo (1888) zur Anwendung gebracht worden. Diese Vorrichtung hat den Zweck, die überschüssige Energie, die mittels der Regulierwiderstände in Wärme umgesetzt wird und somit verloren geht, als mechanische Arbeit für den Betrieb nutzbar zu machen. Diese Anordnung ist in Fig. 199 dargestellt. Der Anker L der als Motor wirksamen Dynamo, sowie eine dicke Schenkelbewickelung g derselben liegen hintereinander in der einen der Fernleitungen F F. Von den Hauptleitungen der Zentrale ist eine dünne Schenkelbewickelung e abgezweigt, welche der Wickelung g entgegenwirkt. In der Abbildung sitzt jede Wickelung, der Deutlichkeit wegen, auf einem Schenkel, in Wirklichkeit sind sie über einander gelegt auf beiden Schenkeln. Die Wickelungen sind so bemessen, daß bei voller Belastung

der Fernleitung die Ampèrewindungen von g diejenigen von e gerade aufheben, daß also ist

$$N_e . I_e - N_g I_g = 0,$$

wenn N_e und N_g die Wickelungszahlen und I_e, I_g die Stromstärken bedeuten.

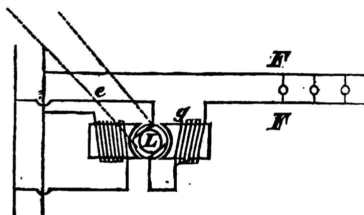


Fig. 199.

Der Motor erzeugt dann keine elektromotorische Gegenkraft und verbraucht keine Spannung. Im entgegengesetzten Falle, wenn die Fernleitung nur eine einzige Lampe zu speisen hat, wird I_g nahezu gleich Null und der Motor wirkt mit voller elektromotorischer Gegenkraft, wobei er mechanische Arbeit abgiebt und somit den Betrieb durch Einwirkung auf die Transmissionswelle der Stromerzeugungsmaschinen unterstützt. Für diese beiden Grenzfälle herrscht zwischen Hauptleitung und Lampen derselbe Spannungsabfall. Die Regulierung findet für alle Beanspruchungen der Fernleitung statt und die vom Motor aufgenommene Energie wird zum größten Teil für den Betrieb in Form von mechanischer Arbeitsleistung nutzbar gemacht.

Eine andere Art der Lahmeyerschen Fernleitungsdynamo zeigt Fig. 200 S. 388, wobei diese Maschine nur als Stromgeber wirkt; dieselbe hat zu diesem Zweck nur eine direkte Schenkelbewickelung. Diese Fernleitungsdynamo

wirkt in der Weise, daß sie immer gerade so viel Hilfsspannung erzeugt, als jeweilig in der Leitung verbraucht

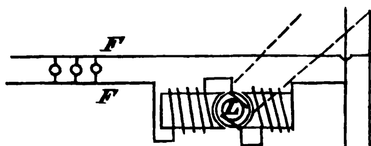


Fig. 200.

wird. Theoretisch hat diese Regulierungsweise als die vollkommenste zu gelten.

172. Elektrizitätsverteilung mittels Transformatoren. — Die Transformatoren werden als Gleichstromtransformatoren und Wechselstromtransformatoren, sowie auch als Wechselstrom-Gleichstromtransformatoren ausgeführt. Die Gleichstrom-Gleichstromtransformatoren können, je nach ihrer Anordnung, sowohl zur Umwandlung eines hochgespannten Gleichstroms in einen Gleichstrom niedrigerer Spannung, als auch umgekehrt zur Umwandlung eines niedrig gespannten Gleichstroms in einen Gleichstrom von höherer Spannung dienen. Im ersteren Falle werden dieselben bei Fernleitungen benutzt, um den mit hoher Spannung zugeführten Strom auf die Betriebsspannung herabzubringen. Andernfalls benutzt man einen Gleichstrom-Gleichstromtransformator, um die Betriebsspannung für die Ladung von Akkumulatorbatterien in erforderlicher Weise zu erhöhen.

Diese Gleichstromtransformatoren sind als Doppeldynamomaschinen gebaut, indem auf der innerhalb der beiden magnetischen Felder rotierenden Betriebswelle zwei Gleichstromanker sitzen, von denen der eine als Elektrizitätserzeuger, der andere als Motor dient.

Die Wechselstrom-Gleichstromtransformatoren werden benutzt, wenn in einer Wechselstromanlage Akkumu-

latoren einen Teil des Betriebes übernehmen sollen, indem dieselben nicht mit Wechselstrom geladen werden können. Ein derartiger Transformator besteht ebenfalls aus einer Doppelmaschine, wobei die eine die Wechselströme für den Betrieb erzeugt, während die andere, die als Gleichstrommaschine gebaut ist, die überschüssige Kraft der Betriebsmaschine als Gleichstrom den Akkumulatoren zuführt, und die in diesen aufgespeicherte Energie durch die Wechselstrommaschine wiederum in Wechselstrom umgesetzt werden kann.

Ein System der Elektrizitätsverteilung mittels Transformatoren, welches von der Firma Siemens & Halske in Anwendung gebracht worden ist, zeigt Fig. 201.

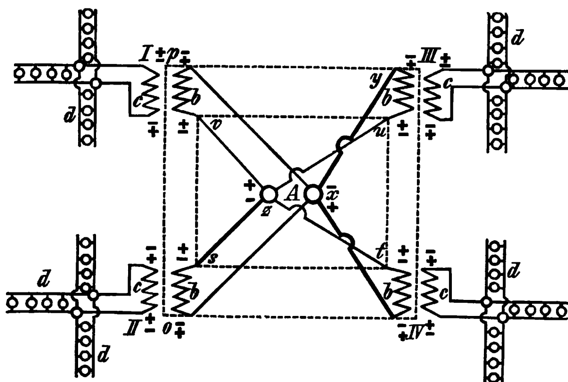


Fig. 201.

Die Stromerzeugungsmaschine ist bei A aufgestellt; b sind die Primärspulen und c die Sekundärspulen der Transformatoren oder Volta-Induktoren, d d stellen parallel geschaltete Lampengruppen dar. Die Verteilungszentren I, II, III, IV sind von der Zentralstation abgezweigt. Um die Stromabgabe in den verschiedenen lokalen Stromkreisen für die verschiedene Anzahl von Lampen zu regeln, sind die

Verteilungszentren I, II, III, IV durch Ausgleichstromkreise vereinigt, welche in der Abbildung durch punktierte Linien dargestellt sind. Es sollen beispielsweise die Lampen der Gruppen I, II, IV im vollen Betrieb sein, während von der Gruppe III nur einige Lampen brennen. Wären keine Ausgleichstromkreise vorhanden, so müßte man die elektromotorische Kraft der Maschine bei A nach der Anzahl der in den vier Gruppen betriebenen Lampen regeln. Die Spannung in den Klemmen des Leitungsnetzes der Gruppe III würde wegen der geringeren Anzahl Lampen, die in dieser Gruppe betrieben werden, sehr hoch sein. Infolge des Vorhandenseins der Ausgleichungsstromkreise wird aber dieser Spannungsüberschuß auf alle vier Gruppen verteilt. Um die Kosten für die Leitungen möglichst zu vermindern hat die Firma Siemens & Halske vorgeschlagen, eines der Kabel **xy** oder **zu** (oder sogar beide), welche den Strom nach der die kleine Lampenzahl enthaltenden Gruppe führen, zu zerschneiden; hierdurch wird der von der einen Klemme der Maschine A ausgehende Strom gezwungen, bei der Rückkehr nach der andern Klemme einen Umweg zu machen und infolgedessen wird die Spannung vermindert und die Regulierung erleichtert. Wenn die beiden Kabel **xy** und **zu** unterbrochen sind, so kann der Strom, welcher die Induktoren der Gruppe III zu speisen hat, nur durch die Ausgleichungsleitungen **tv** und **uv** einerseits und durch die Ausgleichungsleitungen IV, III und **py** anderenteils hindurch. Es kann zu gleichem Zweck eine Einschaltung von Regulierwiderständen in die Leitungen **xy** und **zu** stattfinden.

Das System der Wechselstromtransformatoren wurde zuerst von Goulard und Gibbs im praktischen Betrieb der Beleuchtungsanlagen eingeführt, später von Zipernowski, Déri und Blathi, sowie in Amerika von Westinghouse vervollkommnet. Es wird dabei der Wechselstrom mit einer Spannung von 2000 bis 5000 Volt in dünnen Leitungen den Primärbewickelungen der Transformatoren zugeführt, welche letztere in der Regel parallel

geschaltet sind; die Sekundärbewickelungen sind derartig eingerichtet, daß sie einen niedrig gespannten Strom von etwa 100 bis 120 Volt an die Lampen abgeben.

173. Wahl der Lichtmaschinen. — Die Wahl der Lichtmaschinen wird durch das System der anzuwendenden Stromverteilung bedingt. Je nach Umständen läßt man den Betrieb von einer einzigen genügend großen Maschine besorgen oder verteilt denselben auf mehrere kleinere Maschinen. Letzteres ist bei stark wechselndem Lichtbedarf geboten. Hierbei speist entweder jede Maschine ihren besonderen Stromkreis, oder dieselben wirken in Parallelschaltung auf einen einzigen Stromkreis; sie müssen aber alsdann immer mit gleicher Geschwindigkeit laufen, damit nicht infolge der Verlangsamung des Ganges der einen oder anderen Maschine dieselbe Rückstrom von den anderen Maschinen erhält, wodurch der Lampenbetrieb gestört wird und die betreffende Maschine Schaden leiden kann.

Bei Parallelschaltung von reinen Nebenschlußmaschinen werden nur die positiven Klemmen, sowie die negativen Klemmen derselben unter sich verbunden, wogegen bei Parallelschaltung von Reihenschaltungsmaschinen außerdem noch die nicht mit den Klemmen verbundenen Kontaktbürsten unter sich durch einen Ausgleichwiderstand in Verbindung gesetzt werden müssen. Ein anderes, gleichem Zweck dienendes Mittel, welches von der Firma Siemens & Halske in Anwendung gebracht worden ist, besteht darin, daß der in dem Anker jeder der parallel geschalteten Maschinen erzeugte Strom durch die Magnetbewickelung der nächsten Maschine und also der im Anker der letzten Maschine erzeugte Strom durch die Magnetbewickelung der ersten Maschine geführt wird.

Bei Gleichspannungsmaschinen (Compoundmaschinen) sind ebenfalls die nicht unmittelbar verbundenen Bürsten durch einen Ausgleichsdraht in Verbindung zu setzen (Fig. 202 S. 392). Die Einrückung einer Maschine in die Parallelschaltung der anderen erfolgt unter Benutzung eines, meist aus

einer Glühlampenbatterie bestehenden Widerstandes, um die Stromschwankungen zu verhüten. Die einzuschaltende Maschine wird erst mit diesem genügend starken Widerstand verbunden und dann ihre Spannung mittels eines Regulierwiderstandes genau auf die Spannung der bereits im Betriebe befindlichen Maschinen gebracht, bevor man sie mit letzteren parallel schaltet.

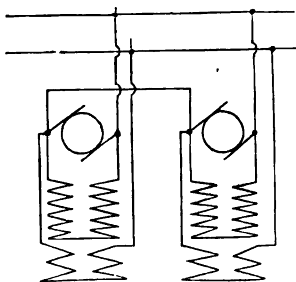


Fig. 202.

Wechselstrommaschinen können ebenfalls in Parallelschaltung betrieben werden, aber nicht in Reihenschaltung. Um die Parallelschaltung derselben herzustellen benutzt man einen sogenannten Phasenindikator (Fig. 203). Derselbe besteht aus einem kleinen Transformator, der mit zwei Primärbewickelungen und einer Sekundärbewickelung versehen ist. Die beiden Primärbewickelungen sind je mit einer der parallel zu schaltenden Maschinen D_1 und D_2 verbunden, während in den Stromkreis der Sekundärbewickelung eine gewöhnliche Glühlampe L oder auch an deren Stelle ein Spannungszeiger eingeschaltet ist. Jenachdem die Ströme der beiden Maschinen bei der Parallelschaltung gleiche oder entgegengesetzte Richtung haben, wird die Lampe, die vorher durch die eine Maschine Strom erhielt und dadurch zum Leuchten gebracht worden war, erlöschen oder heller auf=

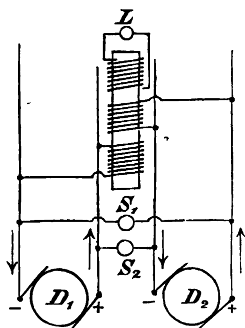


Fig. 203.

leuchten. Bei S_1 und S_2 sind Einschalter angebracht, mit denen die Parallelschaltung bewirkt wird, wobei man die Erregungsströme für die Feldmagnete der beiden Maschinen in entsprechende Übereinstimmung bringt.

Dieselbe Methode kann auch auf mehr als zwei Dynamos ausgedehnt werden, wobei darauf zu achten ist, daß die betreffenden Maschinen schon vor dem Zusammenschalten möglichst gleich belastet sind.

Der Stromkreis der Lampen werde bereits von einer der vorhandenen Wechselstrommaschinen gespeist und es soll zur Unterstützung die zweite Wechselstrommaschine parallel zur ersten eingeschaltet werden.

Man verfährt dabei folgendermaßen:

Man setzt die einzuschaltende Maschine in Gang und bringt die Erregungsströme der Feldmagnete beider Maschinen in entsprechende Übereinstimmung. Hierauf schaltet man in den Stromkreis dieser Maschine von der im Maschinenraum befindlichen, als Widerstand dienenden Glühlampenbatterie so viel Lampen ein, wie die schon im Betrieb befindliche Maschine bereits speist, was man an dem in den Stromkreis dieser Maschine befindlichen Ampèremeter ersehen kann. Alsdann schließt man den Stromkreis für den Phasenindikator, verbindet durch den Einschalter diese Maschine mit dem äußeren Stromkreise und verringert allmählich den von dieser Maschine in die Lampenbatterie gesendeten Strom. Da gewöhnlich jede Wechselstrommaschine mit ihrer besonderen Erregungsmaschine versehen ist, so ist es nötig, vor dem Einschalten der betreffenden Maschine die Erregungsmaschine derselben mit der Erregungsmaschine der bereits in Betrieb befindlichen Wechselstrommaschine parallel zu schalten, was mittels eines Widerstandes geschieht, auf den zunächst diese beiden Maschinen gleichartig arbeiten müssen.

Neunter Abschnitt.

Die elektrische Arbeitsübertragung.

Sechsunddreißigstes Kapitel.

Stationäre Elektromotoren.

174. **Allgemeine Anordnung.** — Es werden zu dem Zweck zwei elektrische Induktionsmaschinen derartig mit einander verbunden, daß der in der einen durch eine gewisse mechanische Arbeitsleistung erzeugte elektrische Strom in entsprechender Weise der anderen Maschine zugeführt und dadurch dieselbe in Umdrehung versetzt wird, so daß durch dieselbe wieder eine gewisse, von der zugeführten elektrischen Energie bedingte Arbeitsleistung geliefert wird. Die erste, stromerzeugende Maschine wird als Generator oder Primärmaschine, die zweite als Rezeptor, Elektromotor oder Sekundärmaschine bezeichnet. Zur Herstellung einer elektrischen Arbeitsübertragungsanlage gehören also mindestens drei Maschinen: 1. die mechanische Arbeitsmaschine oder Betriebsmaschine, welche aus einer Dampf- oder Gasmaschine, einem Wasserrad oder auch einem Windrade bestehen kann; 2. die Stromerzeugungsmaschine (Primärmaschine), und 3. die Stromverbrauchsmaschine (Sekundärmaschine).

175. **Wirkungsweise der Elektromotoren.** — Wir nehmen zuerst an, der Elektromotor bestehe aus einer magnetelektrischen Maschine, d. h. aus einer mit permanenten Magneten

versehenen Induktionsmaschine. Wird durch die Ankerbewickelung dieser Maschine von einer Primärmaschine aus ein Strom gesendet, so wirkt das Magnetfeld durch seine Kraftlinien derartig auf den Anker ein, daß dieser in eine Drehung versetzt wird, die derjenigen Drehung entgegengesetzt ist, durch welche in diesem Elektromotor als Generator ein Strom in gleicher Richtung erzeugt werden könnte. Es folgt daraus, daß bei Zuführung eines Stromes von entgegengesetzter Richtung zum vorhergedachten die Drehungsrichtung des Motors nach der umgekehrten Seite erfolgt. Der so durch einen zugesendeten Strom in Umdrehung versetzte Anker des Elektromotors entwickelt in seiner Drahtbewickelung eine zur Stromrichtung entgegengesetzte elektromotorische Gegenkraft, welche schwächend auf den zugesendeten Strom einwirkt und die beim Leergang des Motors mit Anwachsen von dessen Umdrehungsgeschwindigkeit immer stärker wird, bis sie mit Rücksicht auf die mechanischen Widerstände im Motor und den elektrischen Widerstand in der Leitung nahezu der Klemmenspannung der Primärmaschine gleich wird und demzufolge der zugesendete Strom bis nahezu auf Null abnimmt. Läßt man den Elektromotor eine Arbeit verrichten, so nimmt seine Umdrehungsgeschwindigkeit mit seiner vermehrten Belastung ab, demzufolge verringert sich auch die elektromotorische Gegenkraft und somit verstärkt sich der Strom. Die elektromotorische Gegenkraft wird durch die Induktion erregt, welche das Magnetfeld auf die Ankerbewickelung ausübt, und daher setzt das Magnetfeld mit wachsender Ankergeschwindigkeit der Ankerdrehung einen Widerstand entgegen.

Wird als Elektromotor eine Dynamomaschine benutzt, so muß dessen magnetisches Feld erst durch den zugeführten Strom erzeugt werden und demzufolge ist dasselbe von der Stromstärke abhängig. Hat man also eine Reihenschaltungsmaschine als Motor, so nimmt bei zunehmender Umdrehungsgeschwindigkeit mit der Stromstärke auch die Stärke des Magnetfeldes ab, so daß dasselbe in entsprechend geringerem

Maße induzierend auf den Anker einwirkt, als wenn (wie bei der magnetelektrischen Maschine) das Magnetfeld konstant ist. Der Anker muß daher eine bedeutend größere Umdrehungsgeschwindigkeit annehmen, weil das Magnetfeld dieser Drehung einen abweichenden Widerstand entgegensetzt, so daß auch die elektromotorische Gegenkraft in geringerem Maße wächst, als bei konstantem Magnetfelde.

Es sei E die elektromotorische Kraft der Maschine, R der Widerstand und I die Stromstärke, dann ist für den Generator die aufgenommene mechanische Arbeit $A = E \, . \, I$ und die elektrische Nutzarbeit an den Klemmen der Maschine $EI - RI^2$, also der Nutzeffekt des Generators:

$$\frac{EI - RI^2}{EI} = \frac{EI - RI^2}{A}.$$

Arbeitet die Maschine als Motor, so wird elektrische Energie für die vom Motor gelieferte mechanische Arbeit verbraucht, und deren Größe bestimmt sich durch die Formel $EI + RI^2$; daher ist der Nutzeffekt des Motors:

$$\frac{EI}{EI + RI^2} = \frac{A}{EI + RI^2}.$$

Der Nutzeffekt des Generators wird Null, wenn $EI = RI^2$ ist; der Nutzeffekt des Motors wird dann gleich 0.5. Wenn also der Generator gar keine Nutzarbeit liefert, ist die Nutzarbeit des Motors mit Bezug auf elektromotorische Kraft und Stromstärke am größten. Bezeichnet man mit e die Klemmenspannung der Maschine, so ist der Nutzeffekt des Generators gleich e/E und der Nutzeffekt des Motors gleich E/e. Bei dem Generator ist die Klemmenspannung immer kleiner, beim Elektromotor immer größer als die elektromotorische Kraft. Dies wird durch den Umstand bedingt, daß der Generator elektrische Energie erzeugt, der Motor aber elektrische Energie verbraucht.

Diese Verschiedenheit zwischen Primär- und Sekundärmaschine tritt auch in der Bürstenstellung hervor. Während

bei dem Generator die Bürsten in der Umdrehungsrichtung des Ankers vorwärts verschoben werden müssen, um den größten Effekt zu erhalten, muß dagegen bei dem Motor eine Verschiebung der Bürsten nach rückwärts stattfinden, um den gleichen Erfolg zu erzielen. Diese Verschiebung der Bürsten wird hauptsächlich bedingt durch die Veränderung des magnetischen Feldes infolge der Ankerrotation. Ist also das Magnetfeld so stark, daß der Magnetismus des Ankers keine bemerkbare Veränderung desselben herbeiführt, so ist keine Verschiebung der Bürsten aus der neutralen Zone des Kommutators nötig und der Kommutator läuft bei dieser Normalstellung der Bürsten funkenfrei. Eine solche Maschine würde aber sehr schwer werden und im Verhältnis zu Gewicht und Herstellungskosten eine zu geringe Leistung ergeben. Durch zweckmäßige Anordnung der Maschine in Bezug auf die Verteilung des Eisens im Magnet und Anker, sowie durch geeignete Drahtbewickelung kann die Bürstenverschiebung, sowie die Funkenbildung am Kommutator auf ein Minimum gebracht werden.

Die Größe der Zugkraft eines Elektromotors wird bestimmt durch die Gleichung:

$$P = C\,(K_m \,.\, I_a)\,L,$$

worin C eine Konstante, K_m die mittlere Kraftlinienzahl pro Flächeneinheit an der Stelle, wo die Ankerdrähte sich durch das magnetische Feld bewegen, also die Stärke des Magnetismus, I_a die Stromstärke im Anker und L die Länge des auf den Anker gewickelten Drahtes, soweit derselbe sich im Magnetfelde befindet und folglich der Induktion unterliegt, dem entspricht für die Zugkraft, welche eine Dampfmaschine ausübt:

$$P = C\,x\ \text{Dampfdruck} \times \text{Kolbenfläche}.$$

Dem Dampfdruck der Dampfmaschine entspricht also bei dem Elektromotor ein Produkt zweier Größen, nämlich das Produkt aus Magnetstärke und Stromstärke.

176. Konstruktion der Elektromotoren. — Im allgemeinen gelten für die Elektromotoren dieselben Regeln, wie für die Elektrizitätserzeugungsmaschinen. Die Gleichstromelektromotoren werden als Reihenschaltungsmaschinen, oder auch als Nebenschlußmaschinen, sowie auch als Gleichspannungsmaschinen (Compoundmaschinen) ausgeführt.

Für die Konstruktion einer als Motor zu benutzenden Dynamomaschine sind die folgenden rekapitulierten Regeln maßgebend:

Ist i der um die Schenkel der Maschine in Zm Windungen kreisende Strom, so ist das Produkt i . Zm die Zahl der das Magnetfeld erzeugenden Ampèrewindungen, wofür abgekürzt gesetzt wird A W. Von der Zahl dieser A W ist die Stärke der Magnetisierung der Eisenteile der Maschine abhängig. Um die Stärke der Magnetisierung und ihre Richtung zu kennzeichnen, hat man den Begriff der Kraftlinien eingeführt; Zahl und Richtung der Kraftlinien geben ein Maß für die Beschaffenheit der Magnetisierung. Ist das Eisengerippe der Maschine gegeben, so kann man die Kraftlinienzahl berechnen, welche durch eine bekannte Zahl von A W im Eisen hervorgerufen wird. Die Form der Abhängigkeit der beiden Größen läßt sich sofort aus einer graphischen Darstellung ersehen, indem man die A W als Abscissen, die Zahlen K der Kraftlinien als Ordinaten aufträgt, welche bei verschiedenen A W durch eine in der neutralen Zone liegende Ankerwindung gehen.

Die so erhaltene Kurve wird als die Charakteristik der Maschine bezeichnet und dieselbe bildet die Grundlage für die Berechnung der Maschine (vergl. S. 327). In der Nähe des Ursprungs, das ist für kleine A W-Zahl, steigt die Kurve nahezu geradlinig empor und die Zahl der Kraftlinien wächst also nahezu proportional zu den A W. Die Maschine befindet sich dann im Zustande geringer magnetischer Sättigung. Bei Steigerung der A W nimmt die Kraftlinienzahl immer langsamer zu; die magnetisierende Wirkung steigert sich allmählich bis zur Sättigung des Eisens

und endlich tritt die Sättigung insoweit ein, daß trotz Hinzufügung vieler Ampèrewindungen (A W) nur noch eine sehr geringe Steigerung der Kraftlinienzahl zu erreichen ist. Die Kurve läuft dann nahezu parallel zur Abscissenachse.

Bezeichnet man mit E die elektromotorische Kraft eines Stromerzeugers oder die elektromotorische Gegenkraft eines Elektromotors, mit n die minutliche Umdrehungszahl des Ankers und mit Za die Ankerwindungszahl, so besteht die Grundgleichung:

$$E = \frac{n \,.\, Z_a \,.\, K}{30 \,.\, 10^8}.$$

Ferner gilt für die von einem Elektromotor abgegebene mechanische Arbeit A (ausgedrückt in Volt-Ampère, wovon 736 = 1 Pferdestärke sind) beim Umsetzungsverhältnis D von elektrischer in mechanische Arbeit die Bezeichnung:

$$A = D \,.\, E \,.\, I,$$

wenn I die Stromstärke im Anker der Maschine bezeichnet.

Eine andere Gleichung giebt die Beziehung der Klemmenspannung D eines Elektromotors mit seiner elektromotorischen Gegenkraft E, nämlich:

$$D = E + I \,.\, W,$$

wenn W den Ankerwiderstand bezeichnet.

Für stationäre Elektromotoren können ohne weiteres die üblichen Formen der Dynamomaschine dienen und in der That werden diese dazu benutzt. Für kleine Elektromotoren wählt man möglichst kompakte Formen.

Zwei derartige Formen sind in Fig. 204 und Fig. 205 S. 400 dargestellt.

Fig. 204 zeigt den kleinen, sogen. K-Motor der Firma Siemens & Halske. Derselbe ist mit einem Ringanker versehen, dessen Welle von einem einzigen Lager getragen wird. Es wird dieser Motor in vier Modellen von 1/12, 1/4, 1/2 und 1 Pferdestärke ausgeführt.

Fig. 205 stellt den kleinen Motor der Berliner Allgem. Elektrizitätsgesellschaft dar. Derselbe ist ebenfalls mit Ringanker versehen.



Fig. 204.

Diese kleinen Motoren sind zum Betrieb kleiner Arbeitsmaschinen, wie Nähmaschinen, Pumpen, Ventilatoren &c., zu benutzen. Sie sind von sehr einfacher Konstruktion und in der Benutzung äußerst bequem. Sie können an die Lichtleitungen angeschlossen werden und sind jederzeit betriebsfähig; mittels Drehung eines kleinen Handhebels können sie sofort an- oder abgestellt werden.



Fig. 205.

177. Die Schaltungsweisen der Elektromotoren. — Eben so wie bei den Dynamomaschinen werden auch bei den Elektromotoren drei Schaltungs- oder Bewickelungsweisen benutzt, nämlich die Reihenschaltung, die Nebenschlußschaltung und die gemischte Schaltung, d. h. Reihen- und Nebenschlußschaltung vereinigt.

Die Reihenschaltungsmotoren. Bei der Reihenschaltung fließt der Betriebsstrom direkt nach einander durch Anker- und Schenkelbewickelung, indem diese Bewickelungen einfach hintereinandergeschaltet sind. Ein solcher Motor wird vom hineingesendeten Strome sofort mit großer Kraft in Umdrehung versetzt und beim Leergang nimmt derselbe eine große Geschwindigkeit an. Wird der Strom ebenfalls von einer Reihenschaltungsmaschine geliefert, welche nur diesen Motor speist, und ist deren Geschwindigkeit konstant, so dreht sich auch der Motor selbst bei wechselnder Belastung nahezu mit derselben Geschwindigkeit, indem seine angestrebten Geschwindigkeitsänderungen das magnetische Feld der Primärmaschine beeinflussen, weil mit zunehmender Geschwindigkeit des Motors die Stromstärke im Stromkreise abnimmt und folglich auch die den Motor treibende elektromotorische Kraft der Primärmaschine sich entsprechend verringert, so daß der Motor auf die normale Geschwindigkeit zurückgeht. Die Zugkraft des Motors ist aber nahezu proportional der Stromstärke und deshalb ist dieselbe mittels eines in den Stromkreis eingeschalteten Regulierwiderstandes leicht zu regeln, weshalb die Reihenschaltungsmotoren für Arbeitsleistungen mit wechselnder Betriebskraft zweckmäßig sind; dieselben werden daher vorzugsweise zum Betrieb elektrischer Lokomotiven oder Eisenbahnwagen benutzt.

Die Reihenschaltungsmotoren sind auch für den Betrieb mit hochgespanntem Strome geeignet, indem man eine entsprechende Zahl solcher, an sich nicht für hohe Spannung eingerichteter Motoren hintereinanderschaltet, wobei diese Motoren von verschiedener Leistungsfähigkeit sein können.

Die Nebenschlußmotoren. Der in die Ankerbewickelung eingeführte Hauptstrom wird in die auf starken Widerstand bewickelten Magnetschenkel abgezweigt, so daß nur ein geringer Bruchteil des Stromes zur Magnetisierung der Schenkel benutzt wird.

Ein Elektromotor dieser Art arbeitet mit konstantem Magnetismus, sofern derselbe nicht durch mechanische Regulierung beeinflußt wird.

Für die Ankerstromstärke gilt die Gleichung

$$I_a = \frac{E - E^1}{W_a},$$

worin E die Klemmenspannung des Motors, d. h. die in dessen Bürsten eingeleitete elektromotorische Kraft, und E^1 die elektromotorische Gegenkraft ist, welche durch die Bewegung des Ankerdrahtes im magnetischen Felde in diesem Drahte entwickelt wird; W_a ist der Leitungswiderstand des Ankerdrahtes.

Diese Verhältnisse sind in dem folgenden Beispiele dargelegt.

Der Motor arbeitet bei 120 Volt im Volllauf mit 60 Ampère und liefert bei 1200 Umgängen in der Minute 8.5 Pferdestärken. Der Motor verbraucht demnach 120 × 60 = 7200 Volt-Ampère oder Watt. Sein Wirkungsgrad beträgt also 87 Proz. Bei größeren Motoren kann der Wirkungsgrad bis 92 Proz. steigen.

Der Ankerwiderstand ist gleich 0.075 Ohm, die elektromotorische Gegenkraft bei Volllauf etwa 115.5 Volt, daher gilt für die Stromstärke des Motors im Volllauf die Gleichung:

$$I_a = \frac{120 - 115.5}{0.075} = 60 \text{ Ampère.}$$

Im Leerlauf verbraucht der Motor etwa 6 Ampère und macht 1250 Umgänge in der Minute. Es gilt somit für die Stromstärke im Leerlauf die Gleichung

$$I_a = \frac{120 - 119.55}{0.075} = 6 \text{ Ampère.}$$

Die elektromotorische Gegenkraft E^1 ist also im Leerlauf gleich 119.55 Volt, im Volllauf gleich 115.5 Volt. Dieselbe

nimmt also vom Leerlauf bis zum Vollauf noch nicht ganz um 4 Proz. ab. Da dieselbe aber bei gleichbleibendem Magnetismus direkt proportional der Umlaufzahl ist, so ergiebt sich die folgende Wirkungsweise des Motors:

Wird die Belastung vergrößert, so geht die Umlaufzahl etwas herab und zwar proportional der elektromotorischen Gegenkraft, und in größerem Maße steigt sofort die Stromstärke des Elektromotors, bis die dadurch vergrößerte Zugkraft sich mit der Belastung ausgeglichen hat. Da die Abnahme der Umlaufsgeschwindigkeit vom Leerlauf bis zum Vollauf und umgekehrt auch die Zunahme nur 4 Proz. beträgt, so kann man praktisch die Geschwindigkeit als konstant betrachten.

Wenn in den Stromkreis der Nebenschlußbewickelung der Schenkel ein Regulierwiderstand eingeschaltet ist, so kann die Umlaufsgeschwindigkeit des Nebenschlußmotors beliebig reguliert werden.

Bei Elektromotoren mit gemischter Bewickelung ist die Einrichtung derartig getroffen, daß die Hauptstrombewickelung der Schenkel der Nebenschlußbewickelung entgegenwirkt, so daß mit wachsender Stromstärke die Magnetisierung abnimmt. Diese Hauptstrombewickelung hat insbesondere den Zweck, dem Ankerwiderstand entgegenzuwirken, welcher dadurch entsteht, daß der Ankerstrom als Widerstand auf das magnetische Feld einwirkt. Durch eine geringe Anzahl von Hauptstromwindungen wird dieser Ankerwiderstand und somit auch die Schwankung in der Umdrehungszahl bei wechselnder Belastung auf ein Minimum gebracht.

178. Regulierung der Elektromotoren. — Bei der Ingangsetzung der Motoren sind Anlaßwiderstände erforderlich; dieselben sind als Drahtwiderstand oder als Flüssigkeitswiderstand ausgeführt, letztere werden aber nur bei starken Motoren benutzt. Der dem Motor vorgeschaltete Anlaßwiderstand bezweckt im allgemeinen, daß bei der Ingangsetzung des Motors, wo derselbe seine elektromotorische

Gegenkraft noch nicht entwickelt hat, der Strom allmählich zugeführt wird. Bei den Nebenschlußmotoren ist der Anlaßwiderstand insbesondere zur anfänglichen Erregung des Magnetfeldes nötig, indem derselbe dem Anker vorgeschaltet wird, um den Strom in die Schenkelbewickelung zu lenken, bis der Anker infolge zunehmender Umdrehungsgeschwindigkeit die dazu nötige elektromotorische Gegenkraft entwickelt. Der Anlaßwiderstand ist deshalb mit der zunehmenden Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers allmählich wieder auszuschalten. Für die Nebenschlußmotoren wird der Anlaßwiderstand oft noch mit einem Regulierwiderstand für die Schenkel vereinigt. Durch Einschalten dieses Regulierwiderstandes in die Schenkelbewickelung kann die Umdrehungsgeschwindigkeit des Motors erhöht werden; es wird nämlich durch Einschalten des Widerstandes in die Schenkelbewickelung das Magnetfeld geschwächt und somit kann der Anker erst bei einer größeren Geschwindigkeit die zur Ausgleichung erforderliche elektromotorische Gegenkraft erzeugen.

Die **Umsteuerung der Elektromotoren** wird in der Regel durch Umlegen der Bürsten bewirkt, wodurch dem Anker der Strom in entgegengesetzter Richtung zugeführt wird. Zu dem Zweck ist der Motor mit zwei Paar Bürsten versehen, von denen aber immer nur ein Paar in diametraler Richtung sich gegenüber befindlich am Kommutator anliegt. Durch Bewegung eines Hebels kann das eine oder andere Paar der Bürsten an den Kommutator angelegt werden. Der Umsteuerungshebel der Bürsten ist noch mit einem Regulierwiderstand verbunden, um vor dem Umlegen der Bürsten den Strom insoweit abzuschwächen, daß beim Abheben der Bürsten kein starkes Feuer auftreten kann.

179. **Wechselstrom- und Drehstrommotoren.** — Man kann die Wechselstrommotoren einteilen in 1. Motoren mit Wechselstromfeld und Gleichstromanker; 2. Motoren mit Wechselstromfeld und periodischem Wechselstromanker; 3. Motoren mit Drehfeld.

Im ersten Falle arbeitet der Motor im Vergleich zur Wechselstrom-Erzeugungsmaschine umgekehrt, indem bei dieser ein Gleichstromfeld vorhanden ist und der Anker von Wechselströmen durchflossen wird. Wird also bei einer solchen Maschine das Magnetfeld durch einen Gleichstrom erregt und durch die Ankerbewickelung ein Wechselstrom von passender Periode gesendet, so wird der Anker durch ein sich entwickelndes periodisches Kräftepaar mit einer entsprechenden Geschwindigkeit in Umdrehung versetzt, wobei eine Reihenfolge von toten Punkten entsteht, so daß ein solcher Motor nicht mit Belastung von selbst angehen kann, sondern im Leerlauf durch die elektrische Wirkung bis zu seiner normalen Geschwindigkeit, die in Übereinstimmung mit der Wechselstrom-Erzeugungsmaschine steht, in Betrieb gesetzt werden muß, worauf er erst arbeitsfähig ist. In dieser Beziehung ist ein solcher Wechselstrommotor gewissen Gasmotoren ähnlich. Auch darf ein solcher Motor nur bis zu einer gewissen Grenze belastet werden, weil sonst sein isochroner Gang mit der Stromerzeugungsmaschine gestört wird und er zum Stillstand kommt.

Die zweite Klasse der Wechselstrommotoren ist diejenige, bei welcher eine gewöhnliche Dynamomaschine mit Ring- oder Trommelanker im Felde und Anker mit Wechselstrom gespeist wird. Es sind solche Motoren nach verschiedenen Systemen hergestellt worden. Am einfachsten ist es, Feld und Anker mit demselben Wechselstrom in der Art zu speisen, daß der Strom seine Richtung in beiden Teilen der Maschine gleichzeitig ändert. Der Anker wird dadurch gleichmäßig umgetrieben. Es ist jedoch dabei nötig, entweder die Teile ohne Eisen herzustellen, um die störende Einwirkung der magnetischen Trägheit zu beseitigen, wobei aber der Motor für eine gegebene Kraftleistung sehr umfangreich gebaut werden muß, oder man muß die Eisenteile von Magnetfeld und Anker aus dünnen weichen Eisenblechen zusammensetzen; jedoch wird auch hierbei noch die Störung durch magnetische Trägheit sich mehr oder minder bemerklich

machen. Infolge der starken Selbstinduktion, die in einem derartigen Motor zur Wirkung kommt, wird dessen Strom geschwächt und die Phase der Stromschwingung verzögert, so daß ein solcher Motor immer nur mit einem geringen Wirkungsgrade arbeiten wird.

Die dritte Klasse der Wechselstrommotoren arbeitet mit einem sogenannten Drehfeld auf den Anker. Das Drehfeld wird durch ein System verketteter Wechselströme erregt, die in ihren Schwingungsphasen gegen einander gleichmäßig verschoben sind, so daß sie abwechselnd ihre Maximalwirkung auf den Anker ausüben.

Nach der Zahl der Wechselströme, durch welche das Drehfeld bei diesen Motoren erzeugt werden kann, unterscheidet man Zwei-, Drei- oder Mehrphasenmotoren, jedoch ist die Anwendung von mehr als drei Wechselströmen für den vorliegenden Zweck kaum noch praktisch ausführbar. Das Drehfeld kann ferner ein einfaches oder mehrfaches sein, jenachdem nur zwei oder eine größere Anzahl im Umkreis wandernder Pole zur Wirkung gebracht werden. Der bewegliche Teil (Anker- oder Feldmagnet) kann sich synchron mit dem Felde drehen oder mit einer kleinern Winkelgeschwindigkeit umlaufen; man unterscheidet deshalb synchrone und asynchrone Drehstrommotoren. Bei zwei gegen einander winkelrecht gerichteten Magnetfeldern, die mit einem Phasenunterschied von 90° auf einander arbeiten, wirken die beiden Wechselströme nach den Formeln $J_1 = J \sin \alpha$ und $J_2 = J \cos \alpha$. Die Kreisbewegung ist also auf einfache Weise zu erklären und das so gebildete magnetische Drehfeld hat theoretisch konstante Stärke und konstante Winkelgeschwindigkeit.

Bei dem von Tesla konstruierten Zweiphasenmotor ist das den Ringanker umschließende Magnetfeld mit zwei Paar diametralen und zu einander im rechten Winkel stehenden Magnetpolen versehen. Die Bewickelung von je zwei gegenüberliegenden Polen dieses Feldes wird von demselben Wechselstrom durchflossen. Die Spulen der Pol-

ansätze haben die gleiche Windungszahl und die beiden rechtwinklig gegen einander arbeitenden Wechselströme haben dieselbe Stärke aber einen Phasenunterschied von 90°. Der Motor läuft asynchron, indem seine Ankerbewicklung in sich selbst geschlossen ist.

Im allgemeinen wird man ein rotierendes konstantes Drehfeld erhalten, wenn man Magnetfelder im Kreise herum derartig kombiniert, daß die Feldpole erzeugenden Wechselströme in ihrer Aufeinanderfolge nach ihren Intensitäten sich um $\frac{2\pi}{n}$ von einander unterscheiden, das heißt, mit $\frac{2\pi}{n}$ Phasenverschiebung arbeiten und die abwechselnden Feldpole mit einander Winkel von $\frac{360^\circ}{n}$ einschließen.

Die Stärke eines solchen kombinierten Magnetfeldes wird bei der selben Stärke der einzelnen Ströme $\frac{n}{2}$ mal so groß sein, als die Stärke eines Feldes des Teslaschen Motors mit vier Polen und zwei mit 90° Phasenunterschied arbeitenden Strömen von ebenso großer Stärke. Die Zahl der Zuleitungen braucht nur n zu betragen, indem die sämtlichen Ströme eine gemeinschaftliche Rückleitung erhalten können, welche zugleich als Zuleitung eines der n Ströme anzusehen ist, wobei natürlich der Querschnitt dieser gemeinschaftlichen Rückleitung genügend zu bemessen ist.

Bei dem Dreiphasenmotor muß jeder der im Drehfelde wirksamen Ströme gegen den nächst vorhergehenden in seiner Phase um $\frac{\pi}{6} = 60^\circ$ zurückgeschoben sein. Die Stromkreise liegen also in drei Ebenen, die sich unter Winkeln von 60° schneiden.

Siebenunddreißigstes Kapitel.

Die elektrischen Eisenbahnen.

180. Betriebseinrichtung. — Bei der elektrischen Eisenbahn ist die als Stromerzeuger oder Primärmaschine dienende Dynamomaschine stationär und die als Motor dienende sekundäre Dynamomaschine auf einem die Eisenbahn befahrenden Rädergestell oder Wagen angebracht, welches Fuhrwerk die elektrische Lokomotive bildet.

181. Stromzuführungssysteme. — Man unterscheidet fünf Arten dieser Stromzuführung und hat danach fünf Systeme der elektrischen Eisenbahn.

1. Das Dreischienensystem, wobei zwischen den Fahrschienen, auf denen die Räder der elektrischen Lokomotive und ihres Wagenzuges laufen, eine isolierte Mittelschiene angebracht ist, welche als positiver Leitungsstrang dient, während der Strom durch die nicht isolierten Schienen zurückgeht. Die Lokomotive nimmt von der Mittelschiene den Strom durch einen federnden Kontaktreiber auf. Dieses System ist mit dem Übelstand behaftet, daß bei öffentlichen Übergängen leicht durch darüber fahrende Wagen ein kurzer Schluß gebildet und die elektrische Lokomotive dadurch außer Betrieb gesetzt werden kann; außerdem können aber auch darüber gehende Pferde elektrische Schläge erhalten.

2. Das Zweischienensystem. Die eine Fahrschiene bildet den positiven und die andere Fahrschiene den negativen Leitungsstrang, zu welchem Zwecke beide Schienen vollständig isoliert sein müssen, was sehr schwierig auszuführen und auf Dauer zu erhalten ist. Edison und Daft in Amerika haben für dieses System die Leitungsfähigkeit der Schienen verstärkt, der erstere durch vier in die Schiene eingelegte Kupferdrähte, der andere durch eine in die Schiene eingefügte Kupferseele. Dieses System, so wie auch das vorhergehende, erfordern aus den oben angeführten

Gründen einen besonderen Bahnkörper. An den Übergängen ist die Einrichtung getroffen, daß die Schienen durch einen selbstthätig wirkenden Mechanismus nur dann Strom erhalten, wenn der Wagen darüber fährt.

3. Das System der Luftleitung. Die Luftleitung wird durch einen Leitungsdraht hergestellt, welcher oberhalb der Bahn isoliert aufgehängt ist. Unter dem Drahte gleitet ein federnder Kontakt, der mit einer Rolle versehen ist, oder aus einem Drahtbügel besteht, wodurch der Strom der Leitung in den Elektromotor des Wagens geführt wird.

4. Das System der Kanalleitung, wobei die Leitung zwischen den Schienen in einen unter den Erdboden versenkten Kanal eingelegt ist. Auf den Leitungen im Kanal läuft ein kleiner Wagen, der durch einen zutagegehenden längs des Kanals geführten Spalt mittels einer Kupferplatte mit der Lokomotive verbunden ist und dem Motor den Strom zuführt.

5. Das System mit Akkumulatorenbetrieb. Bei diesem System gewinnt man den Vorteil, daß der elektrische Wagen keinerlei Zuleitung bedarf, sondern ganz selbständig, ähnlich wie eine Dampflokomotive, die Bahnstrecke durchfährt. Leider sind aber zurzeit die Akkumulatoren für diesen Betrieb noch zu schwerfällig und auch zu wenig haltbar, da dieselben durch die fortdauernden Erschütterungen sehr rasch zu Grunde gehen.

Zehnter Abschnitt.

Die elektrische Gewinnung und Verarbeitung der Metalle.

Achtunddreißigstes Kapitel.

Die Gesetze der Elektrolyse.

182. **Hauptmethoden der Elektrolyse.** — Die Gewinnung der Metalle auf elektrischem Wege kann entweder durch Ausfällen oder Niederschlagen aus deren in wässeriger Lösung befindlichen Salzen mittels des elektrischen Stromes, das ist durch Elektrolyse, oder durch Reduktion derselben aus ihren Erzen auf trockenem Wege mittels Wärmeerzeugung durch den elektrischen Strom stattfinden.

183. **Allgemeines Prinzip der Elektrolyse.** — Die Elektrolyse beruht auf der chemischen Wirkung des elektrischen Stromes, durch welche die Metallsalzlösungen in der Weise zerlegt werden, daß das Metall sich an der negativen Elektrode (Kathode) abscheidet, wobei (nach dem Faradayschen Gesetz) die Menge der in einer gegebenen Zeit zersetzten Substanz und folglich auch die Menge des ausgeschiedenen Metalls der Stromstärke proportional ist, und bei gleicher Stromstärke die aus verschiedenen Metalllösungen in der Zeiteinheit abgeschiedenen Metallmengen dem Gewichte nach den Verbindungsgewichten der Metalle proportional sind, weshalb

man die unter diesen Bedingungen ausgeschiedenen Metallmengen als die elektrochemischen Äquivalente der Metalle bezeichnet.

Die Gewichtsteile der zersetzten Substanzen oder Elektrolyte für ein Coulomb sind den Molekulargewichten dieser Substanzen proportional, unter der Voraussetzung, daß das elektronegative Element in der Formel der zu elektrolysierenden Verbindung durch ein Äquivalent vertreten ist.

Hat man z. B. Chloraluminium ($Cl_6 Al_2 = Cl Al^{\frac{1}{3}}$) zu zersetzen, so hat man nach der Tabelle auf S. 87 nach den chemischen Äquivalenten Chlor = 35.5 und Aluminium = 13.75, also $Cl + Al^{\frac{1}{3}} = 35.5 + 3.44 = 38.94$. Die elektrochemischen Äquivalente pro Coulomb ergeben $Cl + Al^{\frac{1}{3}} = 0.3678 + 0.0475 = 0.4153$, folglich sind für 38.94 Milligramm Aluminiumchlorid nach der Proportion:

$$0.4153 : 38.94 = 1 : x$$

$x = 93.75$ oder rund 98 Coulomb zur elektrolytischen Zersetzung nötig.

Nach dem Gesetz von W. Thomson ist die zur Elektrolyse nötige elektromotorische Kraft im Minimum auf die folgende Weise zu bestimmen:

Diese minimale elektromotorische Kraft ist proportional der Verbindungswärme des zu zersetzenden Körpers oder Elektrolyts, unter der oben schon angegebenen Bedingung, daß das elektronegative Element durch ein Äquivalent in der Verbindung vertreten ist.

Dies gilt jedoch nur für den Fall, wo keine Sekundärwirkung entsteht, denn nur in diesem Falle ist die für die Elektrolysierung einer chemischen Verbindung aufgewendete Energie durch das Produkt $e\,i$ der elektromotorischen Polarisationskraft e durch die Stromstärke i gleich der Verbindungswärme des Elektrolyts, in absoluten Einheiten des Gewichtes des pro Sekunde zersetzten Elektrolyts. Ist also p das

elektrochemische Äquivalent des Elektrolyts, c die Verbindungswärme pro Gewichtseinheit desselben, so hat man

$$ei = pci,$$

woraus folgt

$$e = pc.$$

Dieser Ausdruck ergiebt die minimale elektromotorische Kraft oder Potentialdifferenz, welche für die Zersetzung eines Elektrolyts nötig ist.

Betrachten wir z. B. die Elektrolyse einer Lösung von Kupfersulfat ($Cu\,SO_4$) zwischen Kupferelektroden. Das ausgeschiedene Kupfer geht hierbei an die Kathode und die Säure an die Anode, welche dabei Äquivalent für Äquivalent aufgelöst wird. Somit wird durch die Reaktion an den Elektroden die chemische Wirkung des elektrischen Stromes ausgeglichen, so daß die elektromotorische Kraft der Elektrolyse gleich Null zu setzen ist. Die ganze Energie des Stromes wird in Wärme umgewandelt, welche eine Temperaturerhöhung des elektrolytischen Bades hervorruft. Nehmen wir ferner an, es werde stark verdünnte Schwefelsäure zwischen einer Kupferkathode und einer Zinkanode der elektrolytischen Wirkung unterworfen. Der Wasserstoff scheidet sich an der Kupferkathode aus, während der Sauerstoff die Zinkanode oxydiert, wobei sich Zinksulfat ($Zn\,SO_4$) bildet. Da aber die Verbindungswärme des Zinksulfats größer ist als die des Schwefelsäurehydrats ($SO_4\,H_2$), so wird eine entsprechende Energiemenge frei, wodurch die elektromotorische Kraft des Stromes erhöht wird. Dieser Zuwachs der elektromotorischen Kraft wird dargestellt durch die Gleichung:

$$E = pc - p'c',$$

wobei pc die Bildungswärme eines elektrochemischen Äquivalents des Zinksulfats und $p'c'$ die Bildungswärme eines elektrochemischen Äquivalents des Schwefelsäurehydrats darstellt.

Bezeichnet man durch c die Bildungswärme der elektrolytischen Masse in Milligramm nach Grammkalorien (0.001 der gewöhnlichen Kilogrammkalorie), so wird die elektromotorische Kraft in Volts ausgedrückt durch

$$e = 0.043\ c.$$

Zur Vervollständigung dieser Gesetze ist von Sprague noch festgestellt worden, daß bei der Mischung mehrerer Elektrolyte stets diejenigen zuerst der Zersetzung unterliegen, welche die geringste Bildungswärme besitzen.

Neununddreißigstes Kapitel.

Die Methoden der Elektrolyse.

184. Die Elektrolyse von flüssigen Auflösungen. — Die der Elektrolyse zu unterwerfenden Substanzen werden in lösliche Verbindungen, Metallsalze, verwandelt und in Wasser oder verdünnten Säuren aufgelöst, um die sogenannten elektrolytischen Bäder zu bilden, in welchen der elektrolytische Prozeß mittels unlöslicher oder auch löslicher Elektroden durch Einleitung des elektrischen Stromes ausgeführt wird. Als lösliche Elektroden benutzt man meist Eisen oder Kupfer, als unlösliche Kohle.

Gewisse Metallsalzlösungen erfordern einen Zusatz von Schwefelsäure oder Salzsäure, um einen regelmäßigen Niederschlag zu liefern. Dies ist insbesondere bei Kupfersulfatlösung der Fall. Durch die freie Säure wird aber dabei der Niederschlag an der Kathode zumteil wieder aufgelöst. Von besonders wichtigem Einfluß auf den Niederschlag an der Kathode ist die Dichtigkeit des elektrischen Stromes, das ist die Zahl der Ampères pro Flächeneinheit der Kathode.

Ist der Strom zu schwach, so bildet sich ein krystallinischer, bröckliger Niederschlag des Metalles. Bei mittlerer normaler

Stromstärke wird der Metallniederschlag dicht und fest, ähnlich wie gegossenes Metall. Bei zu dichtem Strome bildet sich meist ein pulverförmiger Niederschlag.

Gore hat in der folgenden Tabelle die für verschiedene Elektrolyte geeignetste Stromdichte und Potentialdifferenz zusammengestellt.

Art des zu elektrolysierenden Salzes.	Ampères pro qdm der Kathode.	Potentialdifferenz zwischen den Elektroden.
Kupfersulfat	1.2—1.7	0.7
Cyankupfer	0.6	3.0
Cyansilber	0.5	1.0
Cyangold	0.1	4.0
Doppelsulfat von Nickel und Ammonium	0.3—0.6	2—3

Nach Minet gilt die allgemeine Regel, daß die Stromdichte bei der Elektrolyse in Proportion zu dem Verhältnis des elektrochemischen Äquivalents zur Dichtheit des niedergeschlagenen elektropositiven Elementes stehen muß.

Fig. 206 zeigt den von der Firma Siemens & Halske zur Gewinnung des Kupfers auf elektrolytischem Wege benutzten Apparat. Nach diesem Verfahren kann das Kupfer unmittelbar aus dem Erz in fast chemisch reinem Zustande gewonnen werden, wobei alle Schmelzprozesse wegfallen. Bei gewissen Kupfererzen kann selbst die Röstung unterbleiben.

Das Charakteristische dieses Verfahrens insbesondere besteht darin, daß eine Lauge angewendet wird, welche das Kupfer aus dem Erz in Lösung bringt und daß der elektrolytische Prozeß derartig angeordnet ist, daß zu gleicher Zeit das Kupfer aus der Lösung niedergeschlagen und die Lauge, welche durch die Einwirkung auf das Erz an Aufnahmefähigkeit für das Kupfer verloren hat, regeneriert wird.

Die Lauge, durch welche das Kupfer aus dem Erz ausgezogen wird, besteht wesentlich aus einer Lösung von Eisenoxydsulfat in Wasser. Beim Extrahieren des Kupfers aus

dem Erz wird das schwefelsaure Eisensalz zumteil zu Eisen-oxydulsulfat reduziert; bei der Elektrolyse dagegen wird nicht

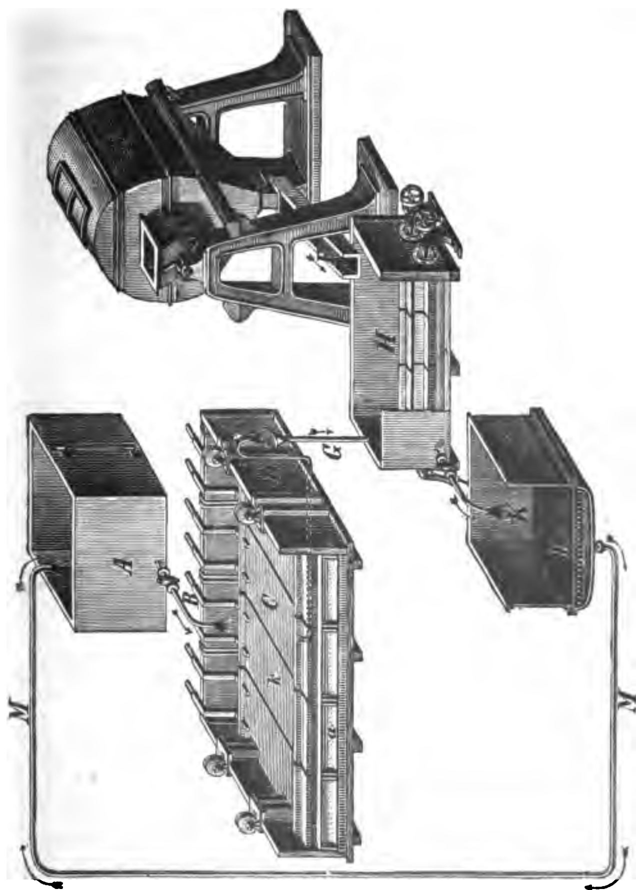


Fig. 206.

nur das Kupfer niedergeschlagen, sondern auch das Eisen-oxydulsulfat wieder in Eisenoxydsulfat verwandelt. Es

findet demnach kein Verbrauch der Lauge statt und mit derselben Lauge können beliebige Mengen Kupfer gewonnen werden.

Die Abbildung illustriert schematisch den Verlauf des Prozesses.

Das in der Kugelmühle E gemahlene Erz wird durch die Rinne F dem Extraktionsapparate H zugeführt und in diesem durch Schaufelräder mit der Lauge bei höherer Temperatur durchgearbeitet. Durch den Ablauf J wird das Gemisch aus Erzmehl und Lauge auf das Saugfilter (Nutsche) K gebracht und von da fließt die vom extrahierten Erzpulver befreite kupferhaltige Lauge in den Behälter A und in das elektrolytische Bad C.

Der obere Teil des elektrolytischen Bades C enthält horizontale Kupferplatten, die als Kathoden dienen; diese Kupferplatten sind an der Unterseite der Bretter K befestigt. Am Boden des Behälters unterhalb der Kupferplatten befindet sich die aus Kohlenstäben bestehende Anode. Der Kathodenraum ist von dem Anodenraum durch ein Filter getrennt. Im Kathodenraum ist ein hölzernes Rührwerk angebracht. An den als Kathoden dienenden Kupferplatten schlägt sich das Kupfer aus der Lauge nieder, während an den als Anode dienenden Kohlenstäben das Eisenoxydul der Lauge in Eisenoxyd umgewandelt wird. Nachdem die Lauge das elektrolytische Bad verlassen hat, wird dieselbe in den Extraktionsapparat H zurückgeführt, um abermals zum Auslaugen von frischem Erz benutzt zu werden.

Der ganze Betrieb erfolgt durch einen Elektromotor.

185. **Die elektrolytische Reingewinnung der Metalle.** — Der einfachste Fall der elektrischen Reingewinnung der Metalle im Großbetriebe der Hütteninduſtrie ist die elektrische Reinigung des Kupfers nach dessen Behandlung im Raffinierofen, wobei derselbe nur etwa noch 2 Proz. Unreinigkeiten enthält und sich in Platten gießen läßt. Diese Methode der Reingewinnung des Kupfers ist von Siemens & Halske ausgebildet und in die hüttenmännische Praxis eingeführt

worden. Die dazu benutzten Dynamomaschinen vermögen, je nach ihrer Stärke, 3 Zentner und 6 Zentner Reinkupfer in 24 Stunden in zwölf hintereinandergeschalteten Bädern zu liefern. Der Arbeitsverbrauch beträgt beziehentlich ungefähr 5 und 10 Pferdestärken und die Elektrodenoberfläche muß in jedem Bade ungefähr 30 qm betragen. Es lassen sich für jede Art von Metallniederschlag durch den elektrischen Strom, ja sogar für jeden elektrochemischen Prozeß im allgemeinen Maschinen konstruieren, welche die betreffende Zersetzung in größerem Maßstabe zu bewirken vermögen. Es ist nicht ratsam, bedeutend größere Maschinen als die oben angegebene größte zu konstruieren; um mehr Reinmetall als 6 Zentner in 24 Stunden zu produzieren, wird man besser mehrere Maschinen anwenden. Die Arbeitskraft muß viel stärker sein, wenn man das Metall nicht aus unreinem Metall, sondern aus einer Lösung abscheidet; in diesem Falle müssen als Kathoden Kohle, Platin, Blei oder andere schwer oxydierbare Stoffe verwendet werden. Die elektrische Scheidung der Metalle wird übrigens nur in solchen Fällen angewendet, wo die Arbeitskraft (Wasserkraft) sehr billig oder das Niederschlagsprodukt sehr wertvoll ist.

Andere elektrometallurgische Prozesse beziehen sich auf die Gewinnung von Silber, Magnesium, Aluminium und Zink.

186. Die Verfahrungsweisen in der Galvanoplastik. — Die galvanoplastischen Niederschläge werden meistens aus Kupfervitriollösungen, am entsprechendsten mittels eines galvanischen Elementes, hergestellt. Der einfachste Apparat ist der Zellenapparat, in welchem die abzuformenden Gegenstände die Stelle der Kupferelektrode im Zinkkupferelemente übernehmen. Ein solcher Zellenapparat ist ein in sich selbst abgeschlossenes Daniell-Element, worin der innere Strom anstatt des äußern benutzt und dadurch das Kupfer aus der Kupfervitriollösung auf der Form niedergeschlagen wird. Diese Form besteht gewöhnlich aus Guttapercha, Wachs oder Stearin und ist durch Einreiben mit Graphit

leitend gemacht. Der Zellenapparat dient nur für kleine galvanoplastische Arbeiten; für größere Arbeiten ist eine getrennte Stromquelle, nämlich mit Batterie oder Dynamomaschine, notwendig. Das Kupferbad wird bereitet, indem man in 100 l Wasser 25 bis 30 kg Kupfervitriol auflöst und durch Einhängen eines siebartigen Gefäßes, das mit Kupfervitriolkrystallen gefüllt ist, dafür sorgt, daß das Bad während des Niederschlagens stets den gehörigen Sättigungsgrad behält. Bei der Anwendung einer getrennten Stromquelle wird der Kupfervitriollösung je nach der Art der Formen ein Zusatz von mehr oder weniger Schwefelsäure zugegeben, worüber die Praxis zu entscheiden hat.

187. **Herstellung von Metallüberzügen.** — Zum galvanischen Vergolden oder Versilbern wendet man die Cyankalilösung der betreffenden Metalle an. In diese werden die sorgfältig gereinigten Gegenstände eingehängt und mit dem negativen Pole der Batterie in Verbindung gebracht, während am positiven Pole je nach dem gelösten Metall eine Gold- oder Silberplatte angebracht wird, welche sich allmählich auflöst und das Bad gleichmäßig stark erhält. Die Vernickelung wird mit ammoniakhaltigen Bädern ausgeführt. Nach Dr. Langbein sollen sich Bäder aus einer Auflösung von reinem schwefelsauren Nickel bewährt haben, denen etwas Salmiak zugesetzt wird, worüber die Praxis zu entscheiden hat.

Galvanische Verzinnung bewirkt man mit einer Lösung von Ätznatron, Zinnchlorür und Cyankalium.

188. **Die Elektrolyse geschmolzener Metallverbindungen.** — Voraussetzung ist hierbei, daß die geschmolzenen Materialien die zur Elektrolysierung genügende elektrische Leitungsfähigkeit besitzen, um starke Ströme hindurchgehen zu lassen. Besonders wichtig ist diese Art der Elektrolyse für solche Metalloxyde, welche so feuerbeständig sind, daß sie durch glühende Kohlen nicht reduziert werden können, wie dies insbesondere bei den Verbindungen der Alkalien und alkalischen Erden der Fall ist.

189. **Die Elektrolyse von Thonerde (Aluminiumoxyd).** — Das Aluminiummetall wurde zuerst im Jahre 1827 von Wöhler in Göttingen dargestellt und von demselben 1845 in zusammenhängender Form gewonnen. In größerem Maßstabe gelang dessen Darstellung zu derselben Zeit Sainte-Claire Déville und gleichzeitig gelang es Bunsen, dieses Metall auch auf elektrolytischem Wege aus seinem Oxyd abzuscheiden. Nach dem Wöhlerschen und Dévilleschen Verfahren, welches dann auch fabrikmäßige Anwendung fand, wurde die Thonerde oder ihre Fluorverbindung im Kryolith in Chloraluminium umgewandelt und alsdann dieses durch Kalium und Natrium in der Glühhitze zersetzt. Indem sich hierbei Chlorkalium und Chlornatrium bildet, wird Aluminium als graues Metallpulver abgeschieden. Um das Metall in zusammenhängender Form zu gewinnen, muß bei der Zersetzung des Chloraluminiums durch Natrium gleichzeitig Wasserstoff zugelassen werden. Das so ausgeführte Verfahren der Aluminiumgewinnung war aber sehr umständlich und kostspielig, indem man zu dem Zweck erst Kali- und Natronsalze zu Metall reduzieren mußte. Die Darstellung des Aluminiums auf elektrolytischem Wege wurde zuerst im großen nach dem Verfahren von Cowles in Amerika ausgeführt.

Die Behandlung des aluminiumhaltigen Materials erfolgt in kastenförmigen gemauerten Öfen, die mit einer feuerfesten Schicht aus Holzkohlenpulver und Kalk ausgekleidet und mit eisernen Deckeln geschlossen sind. Durch zwei seitliche gegenüberliegende Öffnungen werden als Elektroden dicke Kohlenstäbe eingeführt, welche durch metallene Leitungen mit den Klemmen einer Dynamomaschine verbunden sind, die einen starken Strom von etwa 5000 Ampères bei 60 Volts Spannung liefert.

Zur Vorbereitung des Verfahrens wird die Sohle des Ofens mit einer Schicht aus Kalk und Kohlenpulver bedeckt, dann bringt man die Elektroden in Kontakt und stellt in der Mitte des Ofens einen Blechkasten auf, der ebenfalls

mit Kohle umkleidet wird. Hierauf wird die Blechform wieder herausgenommen und in die gebildete Kohlenmulde ein Gemisch von kohle-aluminiumhaltigem Material (Bauxit) und Kupfer oder Eisen gebracht, jenachdem man eine kupfer- oder eisenhaltige Aluminiumlegierung erhalten will. Diese Mischung wird mit Kohle bedeckt und der Ofen geschlossen. Hierauf werden die Kohlenelektroden mit der Dynamomaschine in Verbindung gebracht und einander allmählich genähert, bis die Masse unter der Einwirkung des gebildeten starken Lichtbogens geschmolzen und die Thonerde zu Aluminiummetall reduziert ist, welches sich mit dem andern hinzugefügten Metall zu einer Legierung vereinigt. Der Prozeß dauert etwa ein bis zwei Stunden und erfordert einen bis 5000 Ampères starken Strom. Die so gebildete Legierung enthält 15 bis 30 Proz. Aluminium. Dieselbe wird in Schmelztiegeln mit Kupfer zusammengeschmolzen, um die bekannten Aluminiumlegierungen des Handels zu erhalten.

Ein anderes elektrisches Verfahren zur Darstellung von Aluminium ist von Hérault erfunden worden: Dasselbe wird im großen in der elektrischen Anstalt zu Lauffen ausgeführt.

Zur elektrischen Schmelzung und Reduktion der Thonerde dienen gußeiserne Kästen, in denen das aluminiumhaltige Material mit gewissen Flußmitteln, wie Kochsalz, Flußspat und dergleichen, zusammengebracht wird. Als negative Elektrode wird Kohle benutzt, während die positive Elektrode durch das Eisengefäß gebildet wird. Es ist aber sehr schwierig, auf diese Weise reines Aluminium zu erhalten, indem dasselbe dabei sehr leicht von Eisen und Silicium verunreinigt und in seinem Werte vermindert wird. Neuerdings ist jedoch das Verfahren derartig verbessert worden, daß man reines Aluminium etwa zu dem Preise des Kupfers herstellt. Auch Magnesium wird in ähnlicher Weise wie Aluminium auf elektrolytischem Wege gewonnen. Versuche zur elektrolytischen Gewinnung von Zink und Blei, sowie von Gold und Silber aus Erzen haben bisher zu keinem kommerziell nutzbaren Verfahren geführt.

Litteraturverzeichnis.

Auerbach, F., Die Wirkungsgesetze der dynamoelektrischen Maschinen Wien, Hartleben 1887.

Behringer, A., Kritische Vergleichung der elektrischen Kraftübertragung mit den gebräuchlichen mechanischen Übertragungssystemen. Berlin, Springer 1883.

Exner, Fr., Vorlesungen über Elektrizität. Wien, Hartleben 1888.

Fein, W. E., Elektrische Apparate, Maschinen und Einrichtungen. Stuttgart, Hoffmann 1888.

Fischer-Hinnen, J., Die Berechnung und Wirkungsweise elektrischer Gleichstrom-Maschinen. Praktisches Handbuch für Elektrotechniker und Maschineningenieure. 2. Aufl. Zürich, Meyer u. Zeller 1892.

Flemming, Jenkin, Elektrizität und Magnetismus. Aus dem Englischen von Fr. Exner. Braunschweig 1880.

Fontaine, H., Éclairage à l'Électricité. 3. Aufl. Paris 1888.

Frölich, O., Die dynamoelektrische Maschine. Eine physikalische Beschreibung für technischen Gebrauch. Berlin, Springer 1886.

— — Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus. 2. Aufl. Berlin, Springer 1887.

Geisberg, S. Freih. v., Taschenbuch für Monteure elektrischer Beleuchtungsanlagen. 3. Aufl. München, Oldenbourg 1889.

Gérard, E., Die Elemente der Elektrotechnik. Deutsch von Kareis und Peukert. Wien, Deuticke 1889.

— — Leçons de l'Électricité. Brüssel 1891.

Görges und Zickler, Die Elektrotechnik in ihrer Anwendung auf das Bauwesen. Leipzig, Engelmann 1890.

Grünwald, F., Bau, Betrieb und Reparaturen der elektrischen Beleuchtungsanlagen. Halle, Knapp 1887.

Hagen, E., Die elektrische Beleuchtung mit besonderer Berücksichtigung der in den Verein. Staaten von Nordamerika zu Zentralanlagen verwendeten Systeme. Berlin, Springer 1884.

Heim, Dr. C., Die Einrichtung elektrischer Beleuchtungsanlagen für Gleichstrombetrieb. Leipzig, Leiner 1892.
Hering, C., Principles of Dynamo-Electric-Machines. New York 1888.
Hoppe, E., Die Akkumulatoren für Elektrizität. 2. Aufl. Berlin, Springer 1892.
Hospitalier, E., L'Électricité dans la maison. Paris 1887.
— — Traité élementaire de l'énergie électrique. Paris 1890.
Kittler, E., Handbuch der Elektrotechnik. Stuttgart, Enke 1886 bis 1890.
Krebs und Grawinkel, Jahrbuch der Elektrotechnik. Halle, Knapp 1887—1890.
Krieg, M., Die Ergänzung und Verteilung der Elektrizität in Zentralstationen. Magdeburg 1888.
— — Die Elektromotoren. Leipzig 1890.
— — Taschenbuch der Elektrizität. Leipzig 1890.
Langbein, G., Vollständiges Handbuch der galvanischen Niederschläge. 2. Aufl. Leipzig, Klinkhardt 1889.
Lindner, M., Die Technik der Blitzableiter. Weimar, Voigt 1892.
Niaudet, A., Die galvanischen Elemente. Deutsch bearbeitet von W. Hauck. Braunschweig 1890.
Salomon, Kompletes Handbuch über die Behandlung von Akkumulatoren. Deutsch von L. Huber. Rostock 1887.
Serpieri, A., Das elektrische Potential oder Grundzüge der Elektrostatik. Deutsch von R. v. Reichenbach. Wien, Hartleben 1884.
Thompson, Silv., Dynamoelektrische Maschinen. Deutsch von C. Grawinkel. 4. Aufl. Halle, Knapp 1892.
— — Elementare Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus. Deutsch von A. Himstedt. Tübingen, Laupp 1887.
Uppenborn, F., Geschichte der Transformatoren. München, Oldenbourg 1888.
— — Das internationale elektrische Maßsystem. 2. Aufl. München, Oldenbourg 1884.
— — Kalender für Elektrotechniker 1884—1891.
Wiedemann, G., Die Lehre von der Elektrizität. 1.—4. Band. Braunschweig, Vieweg u. Sohn 1882—1885.
Zacharias, Joh., Die Akkumulatoren zur Aufspeicherung des elektrischen Stromes, deren Anfertigung, Verwendung und Betrieb. Jena, Costenoble 1892.
Zetzsche, K. Ed., Handbuch der elektrischen Telegraphie. 1.—4. Bd. Berlin, Springer 1876—1887.

Register.

Druck von J. J. Weber in Leipzig.

Im Verlage von J. J. Weber in Leipzig sind erschienen und durch jede Buchhandlung zu beziehen:

Illustrierte Katechismen.

Belehrungen aus dem Gebiete der Wissenschaften, Künste und Gewerbe etc.

In Original-Leinenbänden
(sofern nicht anders angegeben).

Ackerbau. Dritte Auflage. — **Katechismus des praktischen Ackerbaues.** Von Dr. Wilhelm Hamm. Dritte Auflage, gänzlich umgearbeitet von A. G. Schmitter. Mit 138 Abbildungen. 1890. 3 Mark.

Agrikulturchemie. Sechste Auflage. — **Katechismus der Agrikulturchemie.** Von Dr. E. Wildt. Sechste Auflage, neu bearbeitet unter Benutzung der fünften Auflage von Hamms „Katechismus der Ackerbauchemie, der Bodenkunde und Düngerlehre". Mit 41 Abbildungen. 1884. 3 Mark.

Algebra. Dritte Auflage. — **Katechismus der Algebra, oder die Grundlehren der allgemeinen Arithmetik.** Von Friedr. Herrmann. Dritte Auflage, vermehrt und verbessert von K. Fr. Heym. Mit 8 Figuren und vielen Übungsbeispielen. 1887. 2 Mark.

Anstandslehre. — **Katechismus des guten Tons und der feinen Sitte.** Von Eufemia von Adlersfeld geb. Gräfin Ballestrem. 1892. 2 Mark.

Archäologie. — **Katechismus der Archäologie.** Übersicht über die Entwickelung der Kunst bei den Völkern des Altertums. Von Dr. Ernst Kroker. Mit 3 Tafeln und 127 Abbildungen. 1888. 3 Mark.

Archivkunde s. Registratur.

Arithmetik. Dritte Auflage. — **Katechismus der praktischen Arithmetik.** Kurzgefaßtes Lehrbuch der Rechenkunst für Lehrende und Lernende. Von E. Schick. Dritte, verbesserte und vermehrte Auflage, bearbeitet von Max Meyer. 1889. 3 Mark.

Ästhetik. Zweite Auflage. — **Katechismus der Ästhetik.** Belehrungen über die Wissenschaft vom Schönen und der Kunst. Von Robert Prölß. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. 1889. 3 Mark.

Astronomie. Achte Auflage. — **Katechismus der Astronomie.** Belehrungen über den gestirnten Himmel, die Erde und den Kalender. Bearbeitet von Dr. Hermann J. Klein. Achte, vielfach verbesserte Auflage. Mit einer Sternkarte und 168 Abbildungen. 1893. 3 Mark.

Auswanderung. Sechste Auflage. — **Kompaß für Auswanderer nach** Ungarn, Rumänien, Serbien, Bosnien, Polen, Rußland, Algerien, der Kapkolonie, nach Australien, den Samoa-Inseln, den süd- und mittelamerikanischen Staaten, den westindischen Inseln, Mexiko, den Vereinigten Staaten von Nordamerika und Kanada. Von Eduard Pelz. Sechste, völlig umgearbeitete Auflage. Mit 4 Karten und einer Abbildung. 1881. 1 Mark 50 Pf.

Bankwesen. — **Katechismus des Bankwesens.** Von Dr. E. Gleisberg. Mit 4 Check-Formularen u. einer Übersicht über d. deutschen Notenbanken. 1890. 2 Mark.

Baukonstruktionslehre. Zweite Auflage. — **Katechismus der Baukonstruktionslehre.** Mit besonderer Berücksichtigung von Reparaturen und Umbauten. Von Walther Lange. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 277 Abbildungen. 1890. 3 Mark.

Baustile. Zehnte Auflage. — **Katechismus der Baustile, oder Lehre der** architektonischen Stilarten von den ältesten Zeiten bis auf die Gegenwart. Von Dr. Ed. Freiherrn von Sacken. Zehnte, verbesserte Auflage. Mit einem Verzeichnis von Kunstausdrücken und 103 Abbildungen. 1892. 2 Mark.

Bergbaukunde. — Katechismus der Bergbaukunde. Von Bergrat G. Köhler. Mit 217 Abbildungen. 1890. 4 Mark.

Bergsteigen. — Katechismus für Bergsteiger, Gebirgstouristen und Alpenreisende. Von Julius Meurer. Mit 22 Abbildungen. 1892. 3 Mark.

Bewegungsspiele. — Katechismus der Bewegungsspiele für die deutsche Jugend. Herausgegeben von J. C. Lion und J. H. Wortmann. Mit 29 Abbildungen. 1891. 2 Mark.

Bibliothekslehre. — Grundzüge der Bibliothekslehre mit bibliographischen und erläuternden Anmerkungen. Neubearbeitung von Dr. Julius Petzholdts Katechismus der Bibliothekenlehre. Von Dr. Arnim Gräsel. Mit 33 Abbildungen und 11 Schrifttafeln. 1890. 4 Mark 50 Pf.

Bienenzucht. Dritte Auflage. — **Katechismus der Bienenkunde und Bienenzucht.** Von G. Kirsten. Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage, herausgegeben von J. Kirsten. Mit 51 Abbildungen. 1887. 2 Mark.

Bleicherei s. Wäscherei 2c.

Botanik. — Katechismus der Allgemeinen Botanik. Von Prof. Dr. Ernst Hallier. Mit 95 Abbildungen. 1879. Kartoniert 2 Mark.

Botanik, landwirtschaftliche. Zweite Auflage. — **Katechismus der landwirt**schaftlichen Botanik. Von Karl Müller. Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage von R. Herrmann. Mit 4 Tafeln und 48 Abbildungen. 1876. 2 Mark.

Buchdruckerkunst. Fünfte Auflage. — **Katechismus der Buchdruckerkunst und** der verwandten Geschäftszweige. Von C. A. Franke. Fünfte, vermehrte und verbesserte Auflage, bearbeitet von Alexander Waldow. Mit 43 Abbildungen und Tafeln. 1886. 2 Mark 50 Pf.

Buchführung. Vierte Auflage. — **Katechismus der Kaufmännischen Buch**führung. Von Oskar Klemich. Vierte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 7 Abbildungen und 3 Wechselformularen. 1889. 2 Mark 50 Pf.

Buchführung, landwirtschaftliche. — Katechismus der Landwirtschaftlichen Buchführung. Von Prof. Dr. K. Birnbaum. 1879. 2 Mark.

Chemie. Sechste Auflage. — **Katechismus der Chemie. Von Prof. Dr. H.** Hirzel. Sechste, vermehrte Auflage. Mit 31 Abbildungen. 1889. 3 Mark.

Chemikalienkunde. — Katechismus der Chemikalienkunde. Eine kurze Beschreibung der wichtigsten Chemikalien des Handels. Von Dr. G. Heppe. 1880. 2 Mark.

Chronologie. Dritte Auflage. — **Kalenderbüchlein. Katechismus der Chrono**logie mit Beschreibung von 33 Kalendern verschiedener Völker und Zeiten. Von Dr. Adolph Drechsler. Dritte, verbesserte und sehr vermehrte Auflage. 1881. 1 Mark 50 Pf.

Dampfmaschinen. Vierte Auflage. — **Katechismus der stationären Dampfkessel,** Dampfmaschinen und anderer Wärmemotoren. Ein Lehr- und Nachschlagebuch für Praktiker, Techniker und Industrielle. Von Ingenieur Th. Schwartze. Vierte vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 264 in den Text gedruckten und 13 Tafeln Abbildungen. 1892. 4 Mark 50 Pf.

Darwinismus. — Katechismus des Darwinismus. Von Dr. Otto Zacharias. Mit dem Porträt Darwins, 30 in den Text gedruckten und 1 Tafel Abbildungen. 1892. 2 Mark 50 Pf.

Drainierung. Dritte Auflage. — **Katechismus der Drainierung und der** Entwässerung des Bodens überhaupt. Von Dr. William Löbe. Dritte, gänzlich umgearbeitete Auflage. Mit 92 Abbildungen. 1881. 2 Mark.

Dramaturgie. — Katechismus der Dramaturgie. Von Robert Prölß. 1877. Geheftet 2 Mark 50 Pf.

Droguenkunde. — Katechismus der Droguenkunde. Von Dr. G. Heppe. Mit 30 Abbildungen. 1879. 2 Mark 50 Pf.

Einjährig-Freiwillige. — Der Weg zum Einjährig-Freiwilligen und zum Offizier des Beurlaubtenstandes in Armee und Marine. Von Oberstlieutenant z. D. Exner. 1891. 2 Mark.

Elektrotechnik. Fünfte Auflage. — **Katechismus d. Elektrotechnik.** Ein Lehrbuch für Praktiker, Techniker und Industrielle. Von Ingenieur Th. Schwartze. Fünfte, verb. und verm. Aufl. Mit 206 Abbild. 1894. 4 Mark 50 Pf.

Ethik. — Katechismus der Sittenlehre. Von Lic. Dr. Friedrich Kirchner. 1881. 2 Mark 50 Pf.

Färberei und Zeugdruck. Zweite Auflage. — **Katechismus der Färberei und des Zeugdrucks.** Von Dr. Hermann Grothe. Zweite, vollständig neu bearbeitete Auflage. Mit 78 Abbildungen. 1885. 2 Mark 50 Pf.

Farbwarenkunde. — Katechismus der Farbwarenkunde. Von Dr. G. Heppe. 1881. 2 Mark.

Feldmeßkunst. Fünfte Auflage. — **Katechismus der Feldmeßkunst.** Von Dr. C. Pietsch. Fünfte, neu bearbeitete Auflage. Mit 75 Abbildungen. 1891. 1 Mark 50 Pf.

Feuerwerkerei. — Katechismus der Lustfeuerwerkerei. Kurzer Lehrgang für die gründliche Ausbildung in allen Teilen der Pyrotechnik. Von C. A. v. Nida. Mit 124 Abbildungen. 1883. 2 Mark.

Finanzwissenschaft. Fünfte Auflage. — **Katechismus der Finanzwissenschaft** oder die Kenntnis der Grundbegriffe und Hauptlehren der Verwaltung der Staatseinkünfte. Von A. Bischof. Fünfte, verb. Aufl. 1890. 1 Mark 50 Pf.

Fischzucht. — Katechismus der künstlichen Fischzucht und der Teichwirtschaft. Wirtschaftslehre der zahmen Fischerei. Von E. A. Schroeder. Mit 52 Abbildungen. 1889. 2 Mark 50 Pf.

Flachsbau. — Katechismus des Flachsbaues und der Flachsbereitung. Von R. Sonntag. Mit 12 Abbildungen. 1872. Geheftet 1 Mark.

Fleischbeschau. Zweite Auflage. — **Katechismus der mikroskopischen Fleischbeschau.** Von F. W. Rüffert. Zweite, verbesserte und vermehrte Auflage. Mit 40 Abbildungen. 1887. 1 Mark 20 Pf.

Forstbotanik. Fünfte Auflage. — **Katechismus der Forstbotanik.** Von H. Fischbach. Fünfte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 79 Abbildungen. 1894. 2 Mark 50 Pf.

Freimaurerei. — Katechismus der Freimaurerei. Von Dr. Willem Smitt, Meister vom Stuhl der Loge Apollo zu Leipzig. 1891. 2 Mark.

Galvanoplastik. Dritte Auflage. — **Katechismus der Galvanoplastik und Galvanostegie.** Ein Handbuch für das Selbststudium und den Gebrauch in der Werkstatt. Von Dr. G. Seelhorst. Dritte, durchgesehene und vermehrte Auflage. Von Dr. G. Langbein. Mit 43 Abbildungen. 1888. 2 Mark.

Gedächtniskunst. Siebente Auflage. — **Katechismus der Gedächtniskunst oder Mnemotechnik.** Von Hermann Kothe. Siebente, von G. Pietsch bearbeitete Auflage. 1893. 1 Mark 50 Pf.

Geflügelzucht. — Katechismus der Geflügelzucht. Ein Merkbüchlein für Liebhaber, Züchter und Aussteller schönen Rassegeflügels. Von Bruno Dürigen. Mit 40 in den Text gedruckten und 7 Tafeln Abbildungen. 1890. 4 Mark.

Geographie. Vierte Auflage. — **Katechismus der Geographie.** Vierte Auflage, gänzlich umgearbeitet von Karl Arenz, Kaiserl. Rat und Direktor der Prager Handelsakademie. Mit 57 Karten und Ansichten. 1884. 2 Mark 40 Pf.

Geographie, mathematische. Zweite Auflage. — **Katechismus der mathematischen Geographie.** Zweite Auflage, umgearbeitet und verbessert von Dr. Hermann Klein. Mit 114 Abbildungen. 1894. 2 Mark 50 Pf.

Geologie. Fünfte Auflage. — **Katechismus der Geologie, oder Lehre vom innern Bau der festen Erdkruste und von deren Bildungsweise.** Von Prof. Hippolyt Haas. Fünfte, verbesserte Auflage. Mit 149 Abbildungen und einer Tabelle. 1893. 3 Mark.

Geometrie. Dritte Auflage. — **Katechismus der ebenen und räumlichen Geometrie.** Von Prof. Dr. K. Ed. Zetzsche. Dritte, vermehrte u. verbesserte Aufl. Mit 228 Abbildungen und 2 Tabellen zur Maßverwandlung. 1892. 3 Mark.

Geometrie, analytische. — **Katechismus der analytischen Geometrie.** Von Dr. Max Friedrich. Mit 56 Abbildungen. 1884. 2 Mark 40 Pf.

Gesangskunst. Fünfte Auflage. — **Katechismus der Gesangskunst.** Von F. Sieber. Fünfte, verbesserte und vermehrte Auflage. Mit vielen Notenbeispielen. 1894. 2 Mark 50 Pf.

Geschichte s. Weltgeschichte.

Geschichte, deutsche. — **Katechismus der deutschen Geschichte.** Von Dr. Wilhelm Kentzler. 1879. Kartoniert 2 Mark 50 Pf.

Gesundheitslehre. — **Naturgemäße Gesundheitslehre auf physiologischer Grundlage.** Von Dr. Fr. Scholz. Mit 7 Abbildungen. 1884. 3 Mark 50 Pf.
(Unter gleichem Titel auch Band 20 von Webers Illustr. Gesundheitsbüchern.)

Girowesen. — **Katechismus des Girowesens.** Von Karl Berger. Mit 21 Geschäfts-Formularen. 1881. 2 Mark.

Handelsmarine. — **Katechismus der Handelsmarine.** Von Kapitän zur See z. D. R. Dittmer. Mit 66 Abbildungen. 1892. 3 Mark 50 Pf.

Handelsrecht. Dritte Auflage. — **Katechismus des deutschen Handelsrechts,** nach dem Allgemeinen Deutschen Handelsgesetzbuche. Von Reg.-Rat Robert Fischer. Dritte, umgearbeitete Auflage. 1885. 1 Mark 50 Pf.

Handelswissenschaft. Sechste Auflage. — **Katechismus der Handelswissenschaft.** Von K. Arenz. Sechste, verbesserte und vermehrte Auflage, bearbeitet von Gust. Rothbaum und Ed. Deimel. 1890. 2 Mark.

Heerwesen. — **Katechismus des Deutschen Heerwesens.** Von Oberstleutnant a. D. H. Vogt. Nach dem Tode des Verfassers herausgegeben von R. v. Hirsch, Hauptmann a. D. Mit einem Nachtrag und 7 Abbildungen. 1890. 2 Mark 50 Pf.

Heizung, Beleuchtung und Ventilation. — **Katechismus der Heizung, Beleuchtung und Ventilation.** Von Ingenieur Th. Schwartze. Mit 159 Abbildungen. 1884. 3 Mark.

Heraldik. Fünfte Auflage. — **Katechismus der Heraldik. Grundzüge der Wappenkunde.** Von Dr. Ed. Freih. v. Sacken. Fünfte, verbesserte Auflage. Mit 215 Abbildungen. 1893. 2 Mark.

Hufbeschlag. Dritte Auflage. — **Katechismus des Hufbeschlages. Zum** Selbstunterricht für Jedermann. Von E. Th. Walther. Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 67 Abbildungen. 1889. 1 Mark 50 Pf.

Hunderassen. — **Katechismus der Hunderassen.** Von F. Krichler. Mit 42 Abbildungen. 1892. 3 Mark.

Hüttenkunde. — **Katechismus der Allgemeinen Hüttenkunde.** Von Dr. E. F. Dürre. Mit 209 Abbildungen. 1877. 4 Mark 50 Pf.

Jagdkunde. — **Katechismus für Jäger und Jagdfreunde.** Von Franz Krichler. Mit 33 Abbildungen. 1891. 2 Mark 50 Pf.

Kalenderbüchlein s. Chronologie.

Kalenderkunde. — **Katechismus der Kalenderkunde. Belehrungen über Zeitrechnung,** Kalenderwesen und Feste. Von O. Freih. von Reinsberg-Düringsfeld. Mit 2 Tafeln. 1876. Geheftet 1 Mark.

Kindergärtnerei. Dritte Auflage. — **Katechismus der praktischen Kindergärtnerei.** Von Fr. Seidel. Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 35 Abbildungen. 1887. 1 Mark 50 Pf.

Kirchengeschichte. — **Katechismus der Kirchengeschichte.** Von Lic. Dr. Friedr. Kirchner. 1880. 2 Mark 50 Pf.

Klavierspiel. Zweite Auflage. — **Katechismus des Klavierspiels.** Von Fr. Taylor, deutsch von Math. Stegmayer. Mit vielen Notenbeispielen. Zweite, verbesserte Auflage. 1893. 2 Mark.

Knabenhandarbeits-Unterricht. — **Katechismus des Knabenhandarbeits-Unterrichts.** Ein Handbuch des erziehlichen Arbeitsunterrichts. Von Dr. Woldemar Götze. Mit 69 Abbildungen. 1892. 3 Mark.

Kompositionslehre. Fünfte Auflage. — Katechismus der Kompositionslehre. Von Prof. J. C. Lobe. Fünfte, verbesserte Auflage. Mit vielen Musikbeispielen. 1887. 3 Mark.

Korrespondenz. Dritte Auflage. — Katechismus der kaufm. Korrespondenz in deutscher Sprache. Von C. F. Findeisen. Dritte, verb. Aufl. 1898. 2 Mark.

Kostümkunde. — Katechismus der Kostümkunde. Von Wolfg. Quincke. Mit 453 Kostümfiguren in 152 Abbildungen. 1889. 4 Mark.

Kriegsmarine, deutsche. — Katechismus der Deutschen Kriegsmarine. Von Kapitän zur See z. D. R. Dittmer. Mit 126 Abbildungen. 1890. 3 Mark.

Kulturgeschichte. Zweite Auflage. — Katechismus der Kulturgeschichte. Von Prof. Dr. J. J. Honegger. Zweite, verm. und verb. Auflage. 1889. 2 Mark.

Kunstgeschichte. Dritte Auflage. — Katechismus der Kunstgeschichte. Von Bruno Bucher. Dritte, verb. Auflage. Mit 276 Abbild. 1890. 4 Mark.

Litteraturgeschichte, allgemeine. Dritte Auflage. — Katechismus der allg. Litteraturgeschichte. Von Dr. Ad. Stern. Dritte, durchges. Aufl. 1892. 3 Mark.

Litteraturgeschichte, deutsche. Sechste Auflage. — Katechismus der deutschen Litteraturgeschichte. Von Oberschulrat Dr. Paul Möbius. Sechste, vervollständigte Auflage. 1882. 2 Mark.

Logarithmen. — Katechismus der Logarithmen. Von Max Meyer. Mit 3 Tafeln und 7 Abbildungen. 1880. 2 Mark.

Logik. Zweite Auflage. — Katechismus der Logik. Von Lic. Dr. Friedr. Kirchner. Zweite, durchges. Aufl. Mit 36 Abbild. 1890. 2 Mark 50 Pf.

Malerei. — Katechismus der Malerei. Von Karl Raupp. Mit 48 Abbildungen und 4 Tafeln. 1891. 3 Mark.

Marine s. Handels- bez. Kriegsmarine.

Markscheidekunst. — Katechismus der Markscheidekunst. Von O. Brathuhn. Mit 174 Abbildungen. 1892. 3 Mark.

Mechanik. Fünfte Auflage. — Katechismus der Mechanik. Von Ph. Huber. Fünfte, wesentlich vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 207 Abbildungen. 1892. 3 Mark.

Meteorologie. Dritte Auflage. — Katechismus der Meteorologie. — Von Prof. Dr. W. J. van Bebber. Dritte, gänzlich umgearbeitete Auflage. Mit 63 Abbildungen. 1893. 3 Mark.

Mikroskopie. Katechismus der Mikroskopie. — Von Prof. Carl Chun. Mit 97 Abbildungen. 1885. 2 Mark.

Milchwirtschaft. — Katechismus der Milchwirtschaft. Von Dr. Eugen Werner. Mit 23 Abbildungen. 1884. 3 Mark.

Mimik. — Katechismus der Mimik und der Gebärdensprache. Von Karl Skraup. Mit 60 Abbildungen. 1892. 3 Mark 50 Pf.

Mineralogie. Vierte Auflage. — Katechismus der Mineralogie. Von Privatdozent Dr. Eugen Hussak. Vierte, neu bearbeitete Auflage. Mit 154 Abbildungen. 1888. 2 Mark.

Münzkunde. — Grundzüge der Münzkunde. Von H. Dannenberg. Mit 11 Tafeln Abbildungen. 1891. 4 Mark.

Musik. Fünfundzwanzigste Auflage. — Katechismus der Musik. Erläuterung der Begriffe und Grundsätze der allgemeinen Musiklehre. Von Prof. J. C. Lobe. Fünfundzwanzigste Auflage. 1893. 1 Mark 50 Pf.

Musikgeschichte. — Katechismus der Musikgeschichte. Von R. Musiol. Mit 15 Abbildungen und 34 Notenbeispielen. 1888. 2 Mark 50 Pf.

Musikinstrumente. Fünfte Auflage. — Katechismus der Musikinstrumente. Von Richard Hofmann. Fünfte, vollständig neu bearbeitete Auflage. Mit 189 Abbildungen. 1890. 3 Mark.

Mythologie. — Katechismus der Mythologie aller Kulturvölker. Von Dr. E. Kroker. Mit 73 Abbildungen. 1891. 4 Mark.

Naturlehre. Vierte Auflage. — **Katechismus der Naturlehre, oder Erklärung der wichtigsten physikalischen, meteorologischen und chemischen Erscheinungen des täglichen Lebens.** Von Dr. C. E. Brewer. Vierte umgearbeitete Auflage. Mit 53 Abbildungen. 1893. 3 Mark.

Nivellierkunst. Dritte Auflage. — **Katechismus der Nivellierkunst.** Von Dr. C. Pietsch. Dritte, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 61 Abbildungen. 1887. 2 Mark.

Nutzgärtnerei. Fünfte Auflage. — **Katechismus der Nutzgärtnerei, oder Grundzüge des Gemüse- und Obstbaues.** Von Hermann Jäger. Fünfte, verm. und verb. Auflage. Mit 63 Abbildungen. 1893. 2 Mark 50 Pf.

Orden. — Handbuch der Ritter- und Verdienstorden aller Kulturstaaten der Welt innerhalb des 19. Jahrh. Auf Grund amtlicher und anderer zuverlässiger Quellen zusammengestellt von Maximilian Gritzner. Mit 760 in den Text gedruckten Abbild. 1893. 9 Mark, in Pergament-Einband 12 Mark.

Orgel. Dritte Auflage. — **Katechismus der Orgel. Erklärung ihrer** Struktur, besonders in Beziehung auf technische Behandlung beim Spiel. Von Prof. E. F. Richter. Dritte, durchgesehene Auflage. Mit 25 Abbildungen. 1885. 1 Mark 50 Pf.

Ornamentik. Vierte Auflage. — **Katechismus der Ornamentik. Leitfaden** über die Geschichte, Entwickelung und die charakteristischen Formen der Verzierungsstile aller Zeiten. Von F. Kanitz. Vierte, verbesserte Auflage. Mit 131 Abbildungen und einem Verzeichnis von 100 Spezialwerken zum Studium der Ornamentikstile. 1891. 2 Mark.

Orthographie. Vierte Auflage. — **Katechismus der deutschen Orthographie.** Von Dr. D. Sanders. Vierte, verb. Auflage. 1878. Kart. 1 Mark 50 Pf.

Pädagogik. — Katechismus der Pädagogik. Von Lic. Dr. Fr. Kirchner. 1890. 2 Mark.

Perspektive. — Katechismus der Angewandten Perspektive. Nebst einem Anhang über Schattenkonstruktion und Spiegelbilder. Von Max Kleiber. Mit 129 Abbildungen. 1892. 2 Mark 50 Pf.

Petrographie. — Katechismus der Petrographie. Lehre von der Beschaffenheit, Lagerung und Bildungsweise der Gesteine. Von Dr. J. Blaas. Mit 40 Abbildungen. 1882. 2 Mark.

Philosophie. Dritte Auflage. — **Katechismus der Philosophie.** Von J. H. v. Kirchmann. Dritte, verbesserte Auflage. 1888. 2 Mark 50 Pf.

Philosophie, Geschichte der. Zweite Auflage. — **Katechismus der Geschichte** der Philosophie von Thales bis zur Gegenwart. Von Lic. Dr. Fr. Kirchner. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. 1884. 3 Mark.

Photographie. Vierte Auflage. — **Katechismus der Photographie, oder** Anleitung zur Erzeugung photogr. Bilder. Von Dr. J. Schnauß. Vierte, den neuesten Fortschritten entsprechend verbesserte Auflage. Mit 34 Abbildungen. 1888. 2 Mark.

Phrenologie. Siebente Auflage. — **Katechismus der Phrenologie.** Von Dr. G. Scheve. Siebente Auflage. Mit einem Titelbild und 18 Abbildungen. 1884. 2 Mark.

Physik. Vierte Auflage. — **Katechismus der Physik.** Von Dr. J. Kollert. Vierte, vollständig neu bearbeitete Aufl. Mit 231 Abbild. 1888. 4 Mark.

Poetik. Zweite Auflage. — **Katechismus der deutschen Poetik.** Von Prof. Dr. J. Minckwitz. Zweite, verm. und verb. Auflage. 1877. 1 Mark 80 Pf.

Projektionslehre. — Katechismus der Projektionslehre. Von Julius Hoch. Mit 100 Abbildungen. 1891. 2 Mark.

Psychologie. — Katechismus der Psychologie. Von Lic. Dr. Fr. Kirchner. 1883. 3 Mark.

Raumberechnung. Dritte Auflage. — **Katechismus der Raumberechnung.** Anleitung zur Größenbestimmung von Flächen und Körpern jeder Art. Von Fr. Herrmann. Dritte, vermehrte und verbesserte Auflage von Dr. C. Pietsch. Mit 55 Abbildungen. 1888. 1 Mark 80 Pf.

Redekunst. Vierte Auflage. — **Katechismus der Redekunst.** **Anleitung** zum mündlichen Vortrage. Von Dr. Roderich Benedix. Vierte, durchgesehene Auflage. 1889. 1 Mark 50 Pf.

Registratur- und Archivkunde. — **Katechismus der Registratur- und Archivkunde.** Handbuch für das Registratur- und Archivwesen bei den Reichs-, Staats-, Hof-, Kirchen-, Schul- und Gemeindebehörden, den Rechtsanwälten rc., sowie bei den Staatsarchiven. Von Georg Holtzinger. Mit Beiträgen von Dr. Friedr. Leist. 1883. 3 Mark.

Reichspost. — **Katechismus der Deutschen Reichspost.** Von Wilh. Lenz. Mit 10 Formularen. 1882. 2 Mark 50 Pf.

Reichsverfassung. Zweite Auflage. — **Katechismus des Deutschen Reiches.** Ein Unterrichtsbuch in den Grundsätzen des Deutschen Staatsrechts, der Verfassung und Gesetzgebung des Deutschen Reiches. Von Dr. Wilh. Zeller. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. 1880. 3 Mark.

Rosenzucht. Zweite Auflage. — **Katechismus der Rosenzucht.** Von Herm. Jäger. Zweite Auflage. Mit 70 Abbild. 1893. 2 Mark 50 Pf.

Schachspielkunst. Zehnte Auflage. — **Katechismus der Schachspielkunst.** Von K. J. S. Portius. Zehnte, verm. und verb. Aufl. 1889. 2 Mark.

Schreibunterricht. Dritte Auflage. — **Katechismus des Schreibunterrichts.** Mit einem Anhang: Die Rundschrift. Dritte, neubearbeitete Aufl. Von Gg. Funk. Mit 82 Figuren. 1893. 1 Mark 50 Pf.

Schwimmkunst. — **Katechismus der Schwimmkunst.** Von Martin Schwagerl. Mit 113 Abbildungen. 1880. 2 Mark.

Spinnerei und Weberei. Dritte Auflage. — **Katechismus der Spinnerei,** Weberei und Appretur, oder Lehre von der mechan. Verarbeitung der Gespinstfasern. Dritte, bedeutend vermehrte Auflage, bearbeitet v. Dr. A. Ganswindt. Mit 196 Abbild. 1890. 4 Mark.

Sprachlehre. Dritte Auflage. — **Katechismus der deutschen Sprachlehre.** Von Dr. Konrad Michelsen. Dritte, verbesserte Auflage, herausgegeben von Eduard Michelsen. 1878. 2 Mark 50 Pf.

Stenographie. Zweite Auflage. — **Katechismus der deutschen Stenographie.** Ein Leitfaden für Lehrer und Lernende. Von Prof. H. Krieg. Zweite, verbesserte Auflage. Mit vielen stenograph. Vorlagen. 1888. 2 Mark 50 Pf.

Stilistik. Zweite Auflage. — **Katechismus der Stilistik.** **Eine Anweisung** zur Ausarbeitung schriftlicher Aufsätze. Von Dr. Konrad Michelsen. Zweite, durchgesehene Auflage, herausgegeben von Ed. Michelsen. 1889. 2 Mark.

Tanzkunst. Sechste Auflage. — **Katechismus der Tanzkunst.** **Ein Leitfaden** für Lehrer und Lernende. Von Bernhard Klemm. Sechste, verbesserte und vermehrte Auflage. Mit 82 Abbildungen. 1894. 2 Mark 50 Pf.

Technologie, mechanische. — **Katechismus der mechanischen Technologie.** Von A. v. Ihering. Mit 163 Abbildungen. 1888. 4 Mark.

Telegraphie. Sechste Auflage. — **Katechismus der elektrischen Telegraphie.** Von Prof. Dr. K. Ed. Zetzsche. Sechste, völlig umgearbeitete Auflage. Mit 315 Abbildungen. 1883. 4 Mark.

Tierzucht, landwirtschaftliche. — **Katechismus der landwirtschaftlichen Tierzucht.** Von Dr. Eugen Werner. Mit 20 Abbildungen. 1880. 2 Mark 50 Pf.

Ton, der gute, s. Anstandslehre.

Trigonometrie. — **Katechismus der ebenen und sphärischen Trigonometrie.** Von Franz Bendt. Mit 39 Abbildungen. 1882. 1 Mark 50 Pf.

Turnkunst. Sechste Auflage. — **Katechismus der Turnkunst.** Von Dr. M. Kloss. Sechste, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 100 Abbildungen. 1887. 3 Mark.

Uhrmacherkunst. Dritte Auflage. — **Katechismus der Uhrmacherkunst.** Von F. W. Rüffert. Dritte, vollständig neu bearbeitete Auflage. Mit 229 Abbildungen und 7 Tabellen. 1885. 4 Mark.

Urkundenlehre. Zweite Auflage. — **Katechismus der Diplomatik, Paläographie, Chronologie und Sphragistik.** Von Dr. Fr. Leist. Zweite Auflage. Mit 6 Tafeln Abbildungen. 1893. 4 Mark.

Versicherungswesen. Zweite Auflage. — **Katechismus des Versicherungswesens.** Von Oskar Lemcke. Zweite, verm. und verb. Aufl. 1888. 2 Mark 40 Pf.

Verskunst. Zweite Auflage. — **Katechismus der deutschen Verskunst.** Von Dr. Roderich Benedix. Zweite Auflage. 1879. 1 Mark 20 Pf.

Versteinerungskunde. — **Katechismus der Versteinerungskunde (Petrefaktenkunde, Paläontologie).** Von Prof. H. Haas. Mit 178 Abbild. 1886. 3 Mark.

Völkerkunde. — **Katechismus der Völkerkunde.** Von Dr. Heinrich Schurtz. Mit 67 Abbildungen. 1893. 4 Mark.

Völkerrecht. — **Katechismus des Völkerrechts. Mit Rücksicht auf die Zeit- und Streitfragen des internat. Rechtes.** Von A. Bischof. 1877. 1 Mark 50 Pf.

Volkswirtschaftslehre. Vierte Auflage. — **Katechismus der Volkswirtschaftslehre.** Unterricht in den Anfangsgründen der Wirtschaftslehre. Von Dr. Hugo Schober. Vierte, durchgesehene Auflage. 1888. 3 Mark.

Warenkunde. Fünfte Auflage. — **Katechismus der Warenkunde.** Von E. Schick. Fünfte, verm. u. verb. Aufl., bearb. von Dr. G. Heppe. 1886. 3 Mark.

Wäscherei, Reinigung und Bleicherei. Zweite Auflage. — **Katechismus der Wäscherei, Reinigung und Bleicherei.** Von Dr. Herm. Grothe. Zweite, umgearbeitete Auflage. Mit 41 Abbildungen. 1884. 2 Mark.

Wechselrecht. Dritte Auflage. — **Katechismus des allgemeinen deutschen Wechselrechts.** Mit besonderer Berücksichtigung der Abweichungen und Zusätze der österreichischen und ungarischen Wechselordnung und des eidgenössischen Wechsel- und Check-Gesetzes. Von Karl Arenz. Dritte, ganz umgearbeitete und vermehrte Auflage. 1884. 2 Mark.

Weinbau. Zweite Auflage. — **Katechismus des Weinbaues.** Von Fr. Jac. Dochnahl. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 33 Abbildungen. 1878. 1 Mark 50 Pf.

Weltgeschichte. Zweite Auflage. — **Katechismus der Allgemeinen Weltgeschichte.** Von Prof. Dr. Theodor Flathe. Zweite Auflage. Mit 5 Stammtafeln und einer tabellarischen Übersicht. 1884. 3 Mark.

Wintersport. — **Katechismus des Wintersports.** Von Max Schneider. Mit 140 in den Text gedruckten Abbildungen. 1894. 3 Mark.

Ziergärtnerei. Fünfte Auflage. — **Katechismus der Ziergärtnerei, oder** Belehrung über Anlage, Ausschmückung und Unterhaltung der Gärten, so wie über Blumenzucht. Von Herm. Jäger. Fünfte, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 76 Abbildungen. 1889. 2 Mark 50 Pf.

Zimmergärtnerei. — **Katechismus der Zimmergärtnerei. Nebst einem Anhang** über Anlegung und Ausschmückung kleiner Gärtchen an den Wohngebäuden. Von M. Lebl. Mit 56 Abbildungen. 1890. 2 Mark.

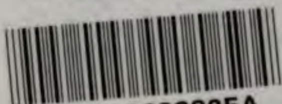
Zoologie. — **Katechismus der Zoologie.** Von Prof. Dr. C. G. Giebel. Mit 124 Abbildungen. 1879. Kartoniert 3 Mark.

Ein ausführliches Verzeichnis mit Inhaltsangabe jedes einzelnen Bandes wird auf Verlangen unberechnet abgegeben.

Verlag von J. J. Weber in Leipzig.

(März 1894.)

Druck von J. J. Weber in Leipzig.


89089683825
B89089683825A



Für Familien und Lesezirkel, [illegible], Hotels, Cafés und Restaurationen.

Einladung zum Abonnement auf die

Illustrirte Zeitung.

Wöchentliche Nachrichten
über alle
Zustände, Ereignisse und Persönlichkeiten der Gegenwart,
über
Tagesgeschichte, öffentliches und gesellschaftliches Leben, Wissenschaft und Kunst, Musik, Theater und Mode.

Jeden Sonnabend eine Nummer von 24 Folioseiten.

Alljährlich über 1000 Original-Abbildungen.

Probenummern gratis und franco.

Abonnementspreis vierteljährlich 7 Mark. — Zu beziehen durch alle Buchhandlungen und Postanstalten.

Leipzig.
Expedition der Illustrirten Zeitung
J. J. Weber.